Superficie nodosa di una selce (*in alto*) proveniente dalla formazione di Gunflint nell'Ontario. Le nodosità corrispondono alla sommità delle colonie costruite dalle alghe azzurre filamentose.

Sezione verticale (*in basso*) di una selce eseguita per mettere in evidenza la struttura di queste formazioni colonnari. Queste sono costituite da strati alterni di quarzo e di selce nera fossilifera.

LE SCIENZE
edizione italiana di SCIENTIFIC AMERICAN

numero 36
agosto 1971
anno IV
volume VII

I fossili piú antichi

In Africa, Australia e Canada sono stati trovati i resti fossilizzati di alghe e batteri, alcuni dei quali risalgono a piú di tre miliardi di anni fa. Essi forniscono notizie importanti sui primi stadi dell'evoluzione

di Elso S. Barghoorn

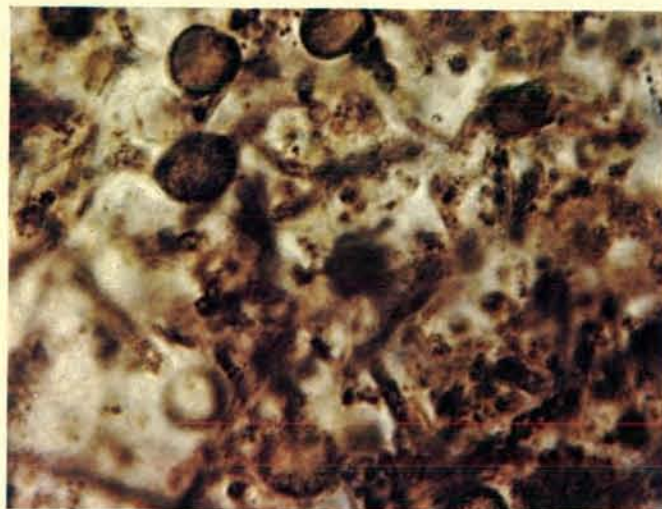
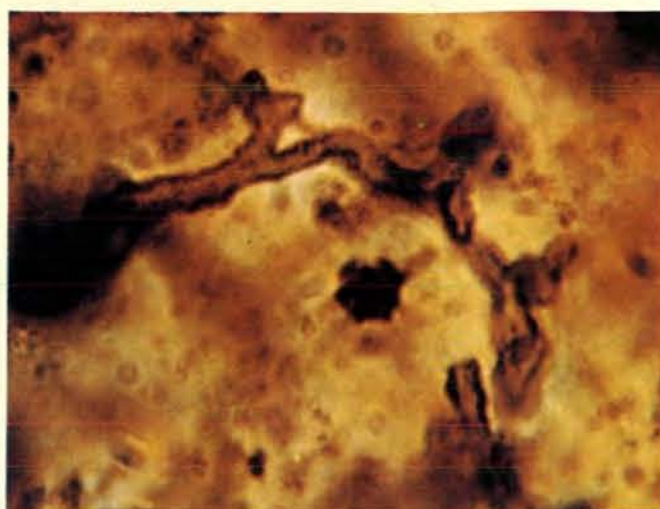
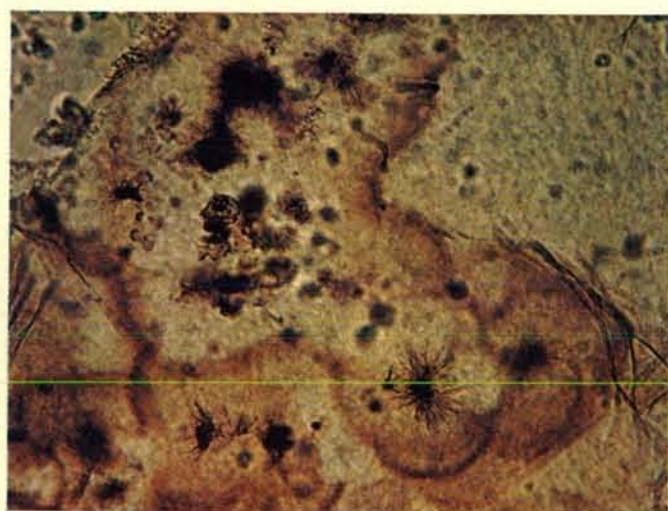
Come si è originata la vita sulla Terra? Fino a non molto tempo addietro i tentativi di rispondere a questa domanda lasciavano molto spazio all'incertezza. Oggi alcuni reperti fossili virtualmente sconosciuti prima degli anni cinquanta hanno consentito di studiare tre degli eventi fondamentali accaduti nei primi stadi dell'evoluzione. Questi fossili sono stati rinvenuti in luoghi molto distanti tra di loro, ma tutti si sono conservati entro particolari rocce del Precambriano, il primo e il piú lungo dei periodi della storia geologica. I fossili piú antichi risalgono a piú di tre miliardi di anni fa.

Tutto quello che si sa o si congettura riguardo all'origine della vita sulla Terra ci porta a ritenere che la comparsa degli organismi viventi sia stata preceduta dalla formazione graduale di un complesso ambiente chimico. Questo ambiente viene usualmente descritto come una soluzione di sostanze organiche, quali amminoacidi, zuccheri e altre sostanze biologicamente importanti, formatesi in seguito a processi non organici. Per l'accumulo, l'elaborazione e la differenziazione di questo primordiale terreno di coltura devono essere stati necessari milioni di anni. Questo periodo può venire definito come il periodo dell'evoluzione chimica, un'idea che si deve in gran parte a un valente studioso delle sintesi abiotiche, Cyril A. Ponnamperuma dell'Ames Research Center, appartenente alla NASA. Considerata come lo stadio preliminare dell'intero processo dell'evoluzione organica, l'evoluzione chimica raggiunge naturalmente il suo punto culminante quando molecole organiche prive di vita vengono riunite a formare, casualmente, un organismo vivente. Questa prima forma di vita è quello che il biochimico russo A. I. Oparin chiama un « protobionte ».

Giudicando sulla base delle forme di vita odierne, i protobionti erano probabilmente organismi unicellulari di dimensioni microscopiche, forse somiglianti agli attuali cocchi, o batteri sferoidali. A ogni modo, piú che immaginare un determinato organismo, consideriamo queste prime forme di vita da un punto di vista piú astratto e diamo loro un nome che dica come vivevano, senza porre ipoteche sulla loro forma. Possiamo chiamarle eterotrofe, vale a dire organismi che non sono in grado di sintetizzare autonomamente le sostanze nutritive a loro necessarie, ma debbono assumerle dall'ambiente che li circonda. (Questo fatto implica che l'organismo sia immerso in un mezzo acquoso, o che viva su una superficie umida, infatti la presenza dell'acqua è indispensabile per mantenere vitale il protoplasma).

In ogni caso possiamo ritenere che gli organismi eterotrofi abbiano rapidamente dato origine a organismi autotrofi. In caso contrario, come fa notare Preston Cloud dell'Università di California, a Santa Barbara, una volta che gli eterotrofi avessero dato fondo alle scorte alimentari presenti nell'ambiente che li circondava, si sarebbero necessariamente estinti, rendendo indispensabile una nuova sintesi di un diverso organismo vivente per rimettere il processo evolutivo in movimento.

In un modo o nell'altro è quindi necessario che dall'originaria popolazione di eterotrofi si sia evoluta una stirpe di autotrofi. Questo nell'evoluzione della vita avvenne nel momento in cui le sostanze nutritive primordiali erano prossime all'esaurimento; si sviluppò quindi la fotosintesi, che è la forma piú plausibile di autotrofismo iniziale. Questa ipotesi non si fonda solamente su considerazioni di ordine termodinamico e fisiologico, ma anche su reperti geologici che dimostrano che gli organismi piú antichi si servivano dalla fotosintesi per l'autonutrizione. Tra le formazioni geologiche piú antiche ve ne sono alcune che recano tracce della presenza di piccole quantità di ossigeno – il sottoprodotto gassoso della fotosintesi – già nella fase piú antica della storia della Terra. Questo indizio chimico viene a coincidere con la scoperta che alcune delle piú primitive forme di vita sulla Terra, organismi che rassomigliavano agli attuali batteri e alle alghe azzurre, stavano aumentando di numero e diversificandosi.

Molti batteri attuali utilizzano la fo-

Microfotografia di un denso ammasso di detriti, cellule sferiche e filamenti ingranditi 250 volte. Tutte le microfotografie di questa pagina rappresentano sezioni sottili di selci di Gunflint.

Filamento tubulare con ramificazioni e rigonfiamenti avente diametro di circa 2 micron. Esso non è paragonabile ad alcun organismo vivente ed è stato denominato *Archaeorestis schreiberensis*.

Una colonia di alghe ingrandita 200 volte. Questi organismi sono stati denominati *Paleorivularia ontarica* a causa della loro somiglianza con il genere attuale di alga azzurra *Rivularia*.

Sezione ingrandita 1000 volte in cui si nota uno stretto contatto tra due cellule di dimensioni diverse. Questo fenomeno rappresenta uno stadio evolutivo verso le cellule eucariote.

Queste due sfere concentriche, distanziate tra loro da alcuni sferoidi piú piccoli, hanno diametro esterno di 30 micron. Gli organismi appartengono alla specie estinta *Eosphaera tyleri*.

Sezione contenente una cellula asimmetrica recentemente scoperta e non ancora classificata. Le selci di Gunflint vengono studiate già da 20 anni, ma rivelano tuttora organismi nuovi.

tosintesi, anche se non producono ossigeno libero come sottoprodotto del processo. Gli indizi che tendono a dimostrare che i primi organismi autotrofi erano simili a questi esseri primitivi sono significativi anche per un'altra ragione. I batteri e le alghe azzurre si distinguono tra gli altri organismi viventi per la semplicità delle loro cellule. Non possiedono un vero e proprio nucleo né organelli specializzati come i mitocondri. Il loro materiale genico si trova sparso entro l'intera cellula e sono incapaci di moltiplicarsi sia per mitosi (divisione della cellula somatica), sia per meiosi (divisione delle cellule germinali). Entrambi questi sistemi di divisione delle cellule sono possibili solo quando il materiale genico è organizzato in cromosomi.

I batteri e le alghe azzurre differiscono quindi profondamente da tutti gli altri organismi: piante, animali e altre forme non classificabili esattamente né come piante né come animali, possedendo caratteristiche tipiche di entrambi i regni. Tutti questi organismi possiedono cellule nucleate e organelli cellulari o altre strutture cellulari specializzate. Queste cellule sono dette eucariote (nucleate) mentre i batteri e le alghe azzurre sono cellule procariote (prenucleate). Sarebbe molto strano che gli autotrofi degli stadi piú primitivi della evoluzione fossero qualcosa di piú che dei procarioti.

La cellula procariota è importante per un'altra ragione ancora. Tutti gli organismi il cui materiale genetico è disperso entro la cellula e la cui riproduzione non è condizionata da una ricombinazione dei geni dei progenitori sono geneticamente conservativi. In organismi di questo tipo le rare mutazioni, invece di venire trasmesse, quando si rivelano utili, vengono eliminate in poche generazioni. Le alghe azzurre sono un chiaro esempio di questo conservatorismo genetico. Alcune specie attuali sono praticamente indistinguibili dalle specie fiorite due miliardi di anni fa e anche piú.

Visti contro questo sfondo di dati di fatto e di ipotesi, quali eventi accaduti nei primi stadi dell'evoluzione della vita possono essere considerati particolarmente importanti? Vi sono tre eventi fondamentali, ognuno dei quali può essere visto come il superamento di una soglia. Il primo di questi, ovviamente, la *conditio sine qua non*, è costituito dalla prima sintesi della sostanza vivente. È il punto di separazione tra il periodo iniziale dell'evoluzione chimica e il susseguente periodo organico. Forse un giorno si scopriranno i resti fossili dei primi organismi viventi, gli eterotrofi che hanno superato questa prima soglia. Nel frattempo i resti dei loro successori, i primi autotrofi capaci di operare una fotosintesi, forniscono la prova che la prima soglia era già stata superata.

Il secondo passo importante è costituito dall'inizio della diversificazione. Con il progredire dell'evoluzione, i primi organismi fotosintetici non potevano rimanere limitati a poche forme simili tra loro. Al contrario, dovevano necessariamente sviluppare delle differenze di forma e di struttura, indici dei diversi ruoli che essi sostenevano nelle diverse nicchie ecologiche.

La terza soglia separa gli organismi procarioti da tutti gli altri. È possibile concepire un mondo popolato solamente da alghe azzurre e da batteri. In effetti pare che a un certo momento, le cose stessero appunto in questo modo. Visto dal nostro attuale punto di osservazione, un mondo cosiffatto non sembra avere molte possibilità di ulteriore evoluzione. La straordinaria varietà di piante e di animali vissuta sulla Terra negli ultimi 600 milioni di anni è stata possibile solamente in seguito allo svilupparsi delle cellule eucariote, con tutto il loro potenziale di diversificazione genetica.

Grazie all'evento fortunato della fossilizzazione degli organismi viventi, oggi noi possediamo le prove del superamento di tutte le tre soglie fondamentali nel corso del lunghissimo periodo Precambriano. Il Precambriano comprende quasi quattro dei primi quattro miliardi e mezzo di vita della Terra. Ha avuto inizio con la formazione della Terra ed è terminato circa 600 milioni di anni fa, con l'inizio dell'era Paleozoica (*si veda la figura a pagina 21*). Dei primi due miliardi di anni non si sa nulla. Le piú antiche rocce conosciute, trovate in Africa, non sono molto piú antiche di tre miliardi di anni.

Rocce precambriane si trovano non solo in Africa, ma anche in tutti gli altri continenti. Le zone meglio conosciute sono lo Scudo Canadese, nell'America settentrionale, e lo Scudo Finno – Scandinavo, in Europa, ma anche piú di un terzo dell'Australia è costituito da uno scudo precambriano e notevoli zone appartenenti a tale periodo si trovano anche nell'America meridionale e in Asia. Alcune rocce Precambriane sono eruttive, altre sono di origine sedimentaria. La maggior parte dei sedimenti precambriani sono stati sottoposti a un intenso metamorfismo: la loro struttura e la loro composizione chimica hanno subito grandi mutamenti a causa della pressione e del calore. In queste rocce metamorfiche si è avuta la distruzione completa non solo dei fossili eventualmente presenti, ma anche di ogni traccia di sostanza organica.

Alcuni sedimenti del Precambriano sono sfuggiti a una trasformazione cosí profonda. Nelle zone dei maggiori scudi precambriani si trovano distribuiti estesi depositi di scisti bituminosi, selci nere e altre rocce sedimentarie rimasti praticamente immuni da fenomeni metamorfici. Queste rocce carboniose – per esempio le formazioni nella regione del Lago Superiore, nell'America settentrionale, nel Transvaal, in Sud Africa, e in certe zone dell'Australia occidentale – appaiono anche all'occhio esercitato molto simili a certe rocce sedimentarie del periodo Carbonifero, che risalgono appena a 300 milioni di anni fa.

I sedimenti precambriani piú antichi oggi conosciuti si trovano nella regione di confine tra la Repubblica del Sud Africa e lo Swaziland. Questa formazione di rocce stratificate con una potenza di molte centinaia di metri viene chiamata Successione dello Swaziland. Nel Barberton Mining Land, un distretto aurifero nei dintorni della città di Barbertown, nel Transvaal orientale, affiora una serie di strati appartenente alla parte centrale della Successione dello Swaziland, chiamata formazione di Fig Tree. Le rocce di Fig Tree sono costituite da depositi di selce nera, grigia e verdastra, intervallati con diaspri, rocce ferrifere, ardesie, scisti e grovacche. Le formazioni di selce hanno una potenza di 120 metri; la selce è spesso fratturata, ma le fratture sono ben cementate e in esse si trova infiltrato il quarzo; in parte la formazione mostra scarse tracce di metamorfismo. Le selci di Fig Tree contengono tracce di sostanza organica e pochi microfossili. Il distretto di Barberton Mountain è stato per molto tempo una redditizia zona mineraria, e per questo la sua geologia è molto ben conosciuta. L'età delle grovacche e delle ardesie è stata determinata da diversi laboratori, utilizzando un metodo basato sul decadimento dello stronzio e del rubidio radioattivi. Questo metodo permette di risalire a 3,1 miliardi di anni fa, ma ci sono validi motivi per ritenere che questi sedimenti vennero depositati ancora prima. Recentemente, le rocce rinvenute alla base della Successione dello Swaziland (e quindi a un livello piú basso delle selci di Fig Tree) hanno rivelato un'età di 3,36 miliardi di anni. Riferendosi a questa determinazio-

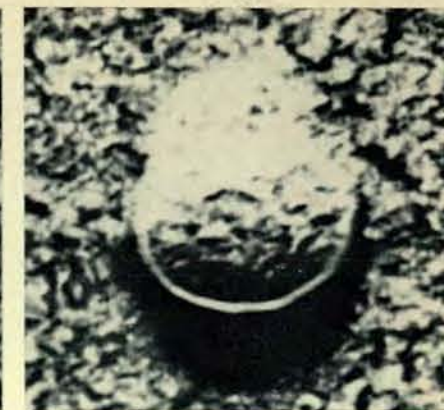
In questa fotografia al microscopio elettronico si può vedere il piú antico batterio conosciuto, fossilizzato entro una formazione rocciosa precambriana che si trova in Sud Africa. Esso appare come una forma rettangolare messa in evidenza eseguendo la replica in carbone del campione di roccia preventivamente levigato e ombreggiato quindi con un metallo pesante. Il batterio proviene dalle selci che fanno parte della formazione di Fig Tree; la lunghezza varia tra 0,50 e 0,75 micron e il diametro è di 0,25 micron. Questi organismi risalgono a 3,2 miliardi di anni fa e sono stati denominati *Eobacterium isolatum*.

ne è probabile che l'età delle selci di Fig Tree superi i 3,2 miliardi di anni.

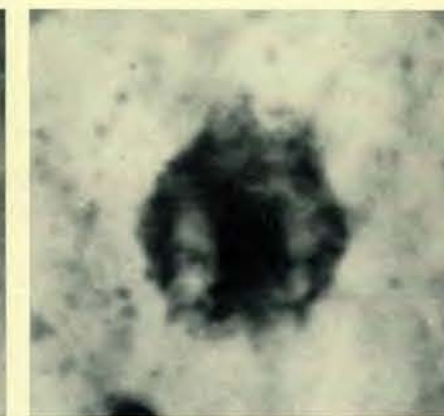
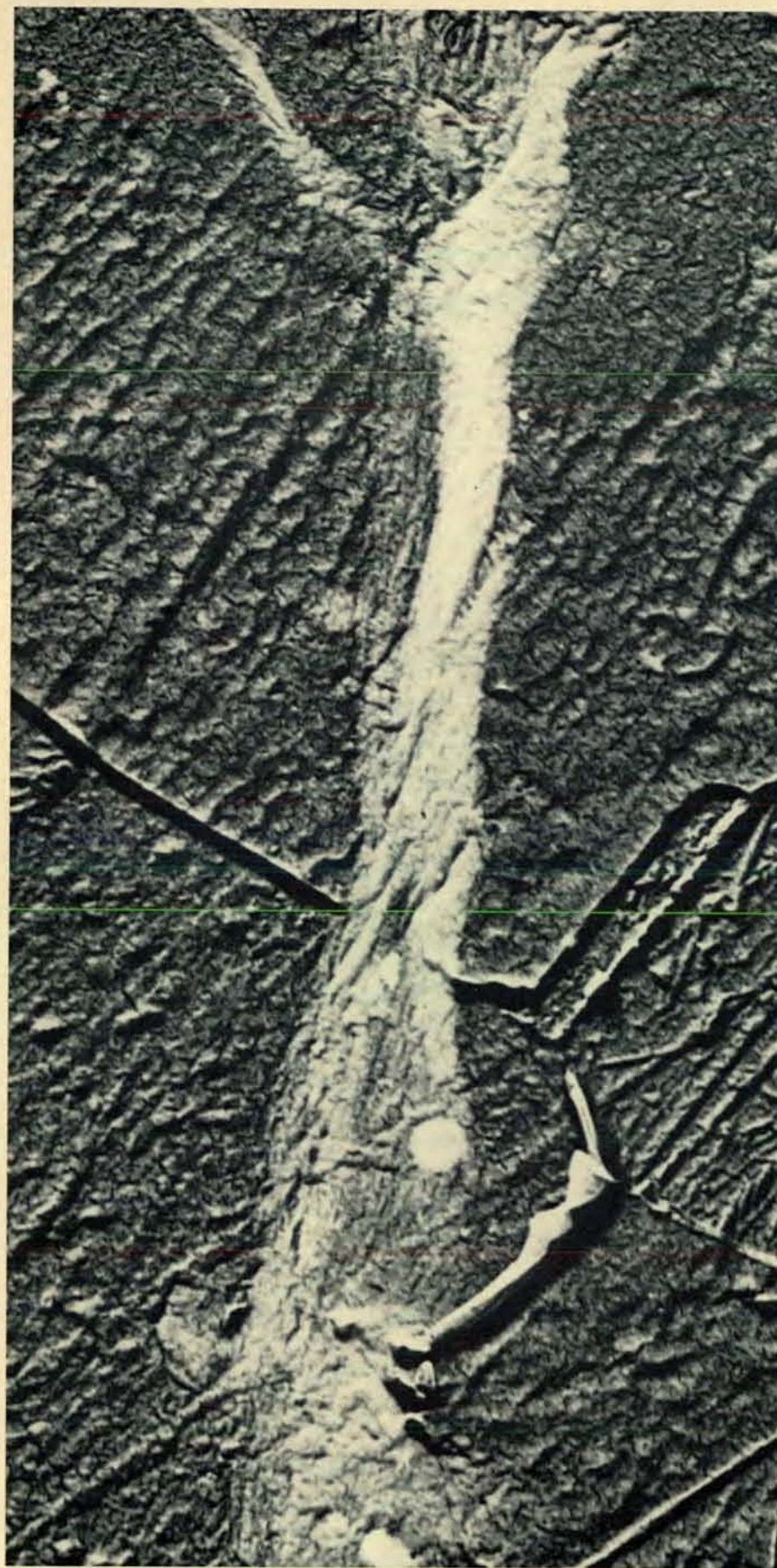
Nel 1965 raccolsi selci provenienti da diverse località della formazione di Fig Tree, da cui vennero ricavati numerosi campioni da esaminare nel mio laboratorio presso l'Università di Harvard. Vennero utilizzate due tecniche: si fecero sezioni sottili delle selci per esaminarle al microscopio e si fecero dei calchi in carbone delle superfici lucidate. I calchi vennero successivamente rivestiti da un sottile velo di metallo e osservati al microscopio elettronico. In questa parte del lavoro ebbi la collaborazione di J. William Schopf.

Esaminando le sezioni sottili al microscopio, potemmo osservare che la matrice della roccia conteneva numerose lamine scure e sostanza organica opaca. Le lamine erano irregolari, ma prevalentemente disposte parallelamente agli strati. Questo fatto ci fece ritenere che si fossero formate entro un bacino sedimentario di origine marina. Non si poteva notare alcuna distorsione dovuta alla presenza di sostanza organica in prossimità dei singoli granuli di calcedonio inclusi nella roccia, segno che il processo di deposizione della sostanza organica avvenne entro una matrice ricca di silice, prima che questa si fosse cristallizzata. Non c'è nessuna prova che la selce fosse di origine secondaria.

È difficile distinguere al microscopio normale una struttura negli straterelli di sostanza organica. Ottenemmo risultati molto piú interessanti dai calchi in carbone; il microscopio elettronico rivelò infatti un gran numero di strutture a bastoncello, ben conservate sia in sezione trasversale, sia longitudinale. Esse avevano dimensioni assai piccole, da 0,5 a 0,7 micron di lunghezza e da 0,2 a 0,3 micron di diametro. Queste cellule avevano una parete che, in sezione trasversale sembrava formata da un doppio strato dello spessore totale di 0,015 micron. Erano dunque assai simili, per forma e dimensioni, a molti attuali batteri.

Il microscopio elettronico rivelò inoltre anche sostanza organica sotto forma di irregolari, sottili filamenti, in cui non si riusciva a distinguere una struttura piú dettagliata. I filamenti si erano formati sicuramente contemporaneamente alle selci e non in seguito a contaminazione. Erano lunghi circa 9 micron e somigliavano a sostanza vegetale decomposta. Benché abbiano sicuramente origine organica, non possono essere paragonati ad alcun tipo di organismo conosciuto. È stata suggerita l'ipotesi che possano essere filamenti polimerizzati di sostanza organica abiotica formatasi entro il « terreno di coltura » primordiale.

Microfotografie di due sezioni trasversali di *Eobacterium*. Nella cellula di destra sono visibili sia la parete interna che quella esterna. La struttura della parete, il cui spessore è di 0,015 micron, è molto simile a quella degli attuali batteri tipo bacillo.

Schopf e io riuscimmo piú tardi a distinguere microfossili di maggiori dimensioni nelle sezioni sottili esaminate al microscopio ottico. Questi fossili hanno forma sferica; esaminammo 28 esemplari particolarmente ben conservati, il cui diametro variava tra i 17 e i 20 micron (*si veda l'illustrazione in fondo alla pagina*). Alcuni avevano l'interno piú scuro, come se il citoplasma si fosse carbonizzato. Come le strutture a bastoncello, osservate al microscopio elettronico, assomigliavano ai batteri attuali, cosí queste cellule sferiche non erano diverse dalle attuali alghe azzurre appartenenti all'ordine delle *Chroococcales*. Potrebbero anzi essere i precursori di queste alghe.

Abbiamo chiamato le forme a bastoncello *Eobacterium isolatum* istituendo un nuovo genere e una nuova specie. Il nome generico (in greco il prefisso *eo* significa primitivo) indica l'antichità di questo organismo e la sua somiglianza con i batteri; il nome specifico si riferisce alla sua caratteristica di non vivere in colonie, ma isolato. Le cellule sferiche sono state chiamate *Archaeosphaeroides barbertonensis*, e costituiscono anch'esse un nuovo genere e una nuova specie. Anche in questo caso il nome generico si riferisce all'antichità e all'aspetto di questi organismi, mentre il nome specifico indica il luogo di provenienza. L'esistenza di questi due organismi, che popolavano l'ambiente acquatico di tre miliardi di anni fa, dimostra che il primo gradino evolutivo, il passaggio cioè dall'evoluzione chimica a quella organica, era avvenuto assai prima di questa data. Sappiamo ora che almeno due specie di organismi apparvero sulla Terra molto prima che fosse trascorso un terzo della sua storia. Se accettiamo la dimostrazione (su cui ritorneremo) che gli organismi simili ad alghe di Fig Tree erano fotosintetici, dobbiamo ritenere che entro quell'epo-

Microfotografie di sezioni sottili di roccia in cui appaiono cellule sferiche simili ad alghe. Queste rappresentano il secondo gruppo di organismi rinvenuto nella formazione di Fig Tree, nel Transvaal. Il diametro delle cellule è generalmente inferiore ai 20 micron. Queste forme sono state denominate *Archaeosphaeroides barbertonensis*.

Microfotografia di un filamento fibroso di sostanza organica simile a tessuto vegetale contenuto nelle selci di Fig Tree. Alcuni esemplari sono lunghi 9 micron. Questi filamenti che non sono paragonabili ad alcun organismo conosciuto, potrebbero rappresentare molecole abiotiche polimerizzate derivanti dal terreno di coltura primordiale.

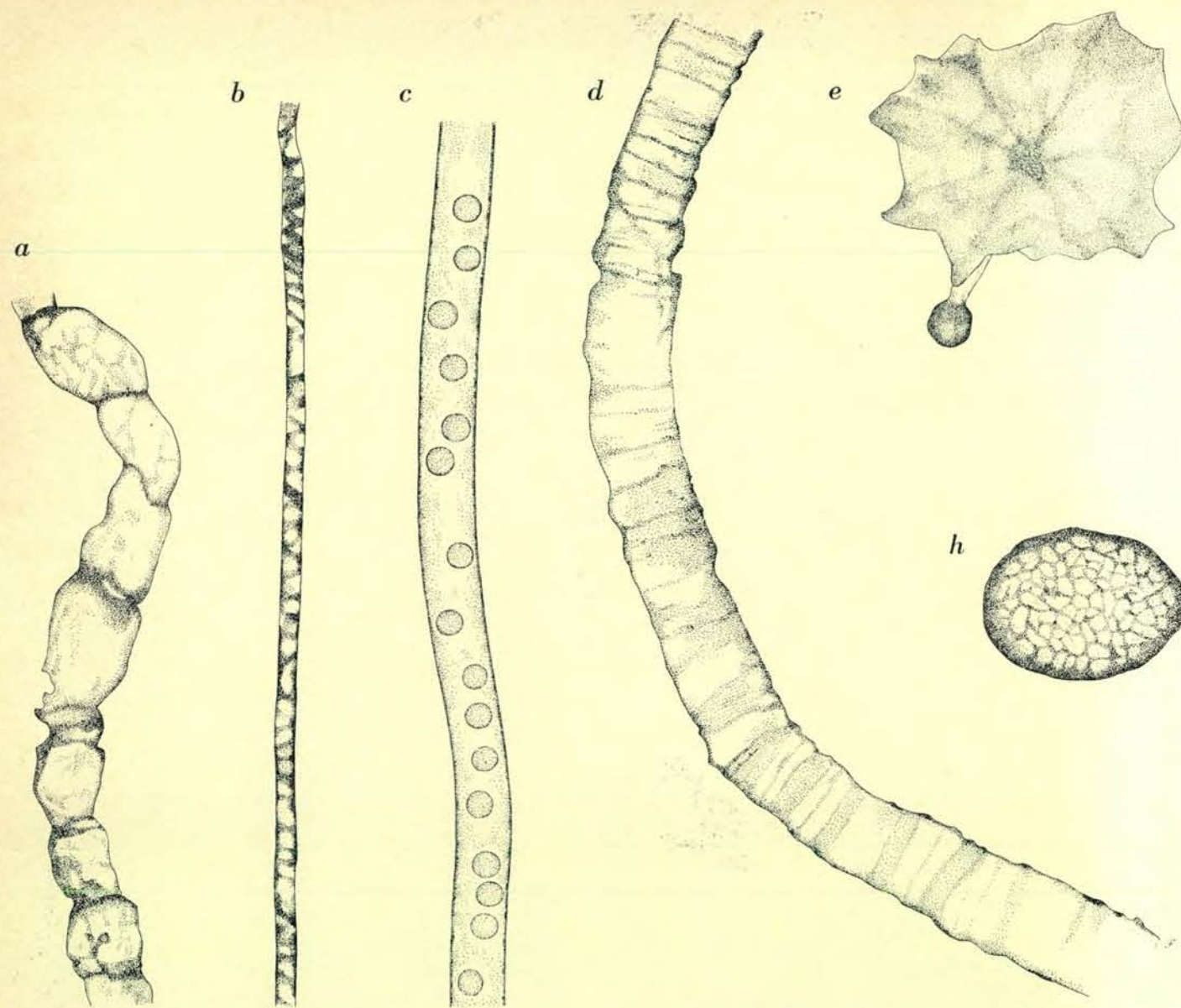
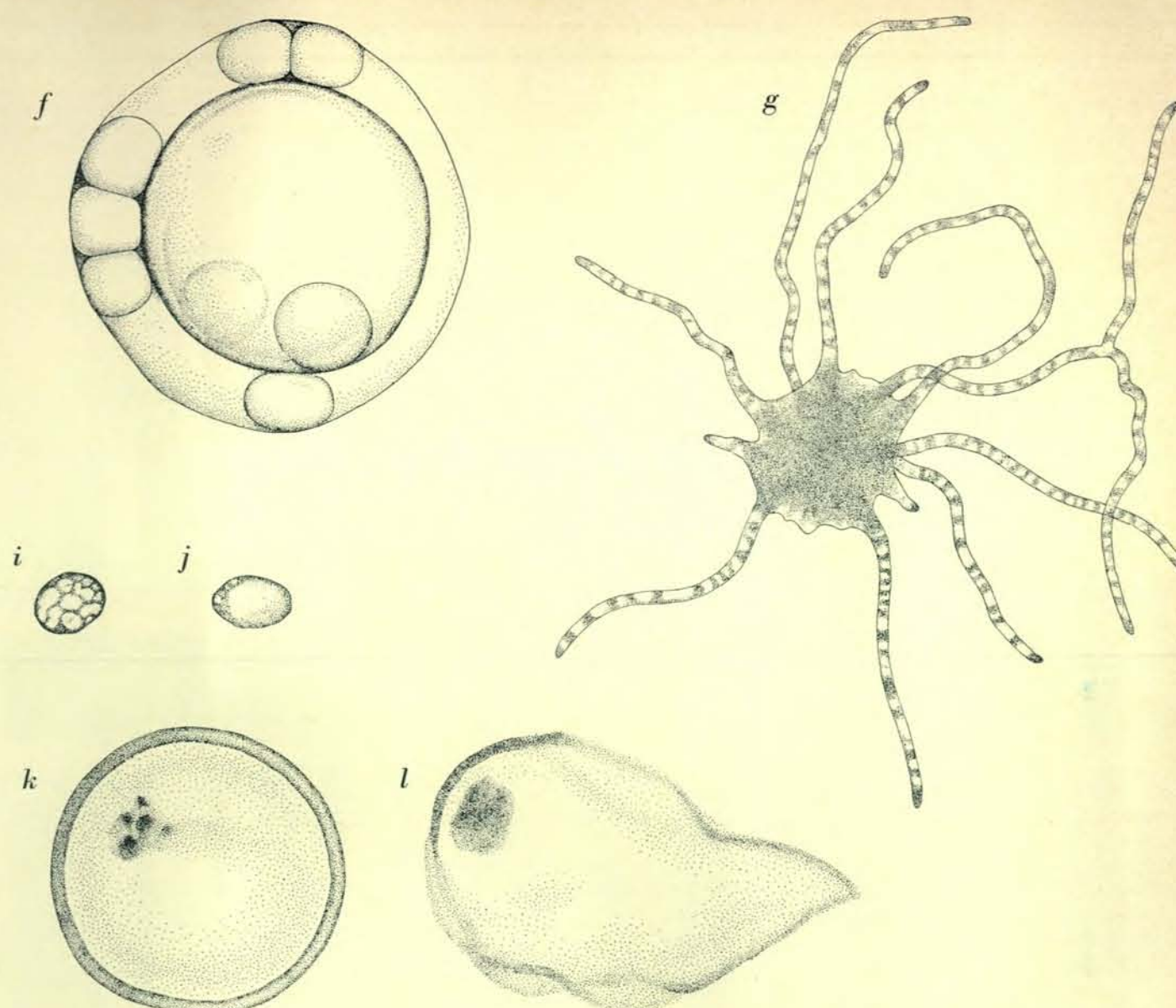
ca doveva essere avvenuto anche un importante evento geochimico. Col sorgere della fotosintesi, cominciò ad apparire anche ossigeno libero, insieme agli altri elementi presenti nell'ambiente. L'apparizione di questo elemento fu un evento che ebbe una profonda influenza, sia dal punto di vista biologico che geologico, sulla successiva storia della Terra.

La dimostrazione del superamento di una seconda soglia evolutiva viene dall'America settentrionale. Lungo le rive del Lago Superiore nell'Ontario, affiorano rocce precambriane, costituite da una serie di sedimenti noti con il nome di formazione ferrifera di Gunflint. Le rocce alla base della formazione di Gunflint contengono strati di selci nere di spessore variabile tra 8 e 22 cm. Gli affioramenti si estendono in maniera piú o meno continua, a volte con ammassi isolati, per circa 180 chilometri nell'Ontario, dai pressi di Schreiber, a est, fino al lago di Gunflint, a ovest. La formazione di Gunflint, al pari della molto piú antica serie di Fig Tree, è stata oggetto di un dettagliato studio geologico.

Al di sotto della formazione di Gunflint si trova un irregolare basamento granitico, che è stato sottoposto a erosione prima del deposito dei sedimenti sovrastanti. Il basamento granitico è stato datato con due diversi tipi di misure di radioattività. Il rapporto argon-potassio, determinato su un concentrato della biotite contenuta nel granito, fornisce un'età di 2,5 ± 0,75 miliardi di anni. L'età di un campione della roccia in toto, misurata in termini del rapporto rubidio-stronzio, risulta di 2,36 ± 0,70 miliardi di anni. L'età del granito fornisce un limite massimo per l'età della formazione di Gunflint, che non può evidentemente essere piú antica.

Campioni di mica separati da rocce situate nei livelli superiori della formazione di Gunflint, raccolti presso Thunder Bay, sono databili, con il metodo del rapporto argon-potassio, a 1,60 ± ± 0,05 miliardi di anni fa. Per ragioni tecniche questa cifra è solo l'80 per cento di quella reale e deve quindi essere corretta a 1,90 ± 0,20 miliardi di anni. Queste miche forniscono quindi un limite minimo per l'antichità delle selci che si trovano alla base della formazione di Gunflint. Sembra ragionevole attribuire alle selci un'età di circa due miliardi di anni, per cui esse sono di circa un miliardo di anni piú recenti dei depositi di Fig Tree.

Le sole rocce della formazione di Gunflint che contengono microfossili

Fotografia al microscopio elettronico in cui i batteri fossili rinvenuti nelle selci di Gunflint sono stati ingranditi 30 000 volte. **Queste forme, che risalgono a due miliardi di anni fa, sono molto simili ai batteri attuali appartenenti al gruppo dei bacilli.**

La diversità di forme delle alghe rinvenute nelle selci di Gunflint dimostra che nel miliardo di anni che separa la deposizione dei sedimenti di Fig Tree da quelli di Gunflint avvenne un notevole progresso evolutivo. I disegni sono stati ricavati in base alle osservazioni di parecchi esemplari di ciascuna specie e comprendono tre forme tra le piú insolite rinvenute. L'ingrandimento, identico per tutte le forme raffigurate, è di 2500 volte. Tra le forme filamentose ve ne sono due appartenenti al genere *Gunflintia*: *G. grandis* (*a*) e *G. minuta* (*b*). Le altre due sono *Entosphaeroides amplus* (*c*) e *Animikiea septata* (*d*). La forma simile a un'idra, *Kakabekia umbellata* (*e*) è analoga a una forma attuale che vive nel terreno. La forma globosa *Eosphaera tyleri* (*f*) non è riuscita a superare il Precambriano. L'*Eoastrion bifurcatum* (*g*) è caratterizzato da una forma raggiata che si trova anche in un'altra specie simile. Nel genere *Huroniospora* sono stati riuniti tre organismi di forma sferica, ma con diversa ornamentazione; essi sono *H. microreticulata* (*h*), *H. macroreticulata* (*i*) e *H. psilata* (*j*). Un organismo unicellulare non ancora classificato (*k* e *l*) presenta una struttura interna che potrebbe essere paragonabile a un nucleo; il secondo esemplare potrebbe essersi fossilizzato all'inizio della divisione cellulare. Se potessimo trovare che esse sono cellule eucariote, avremmo la prova che un evento fondamentale dell'evoluzione avvenne assai prima di quanto si era ritenuto sinora.

sono le selci. Come quelle di Fig Tree, esse si sono evidentemente formate per sedimentazione in un ambiente subacqueo ricco di silice. La maggior parte dei fossili di Gunflint sono tridimensionali (cioè non schiacciati) e molti mostrano finissimi dettagli anatomici. Si è dedotto che la struttura di questi fossili si è conservata perché mineralizzata per l'infiltrazione di silice proveniente dai sedimenti circostanti. È mia opinione che quegli organismi si siano conservati senza subire deformazioni perché si sono depositati in una soluzione silicea che successivamente si è cristallizzata, pressappoco come oggi si inglobano i campioni biologici in resine trasparenti. La delicata struttura dei microrganismi si è conservata grazie all'incomprimibilità della matrice silicea. È un caso tanto raro quanto fortunato. Nella maggior parte dei casi la matrice che circonda i fossili è composta da sedimenti relativamente plastici che vengono fortemente compressi nel corso della loro solidificazione, con il risultato che la conservazione dei tessuti molli, per non parlare della struttura tridimensionale, è una cosa molto rara.

Come è avvenuto il deposito delle rocce di Gunflint? Il quadro della situazione nell'Ontario è piú chiaro di quanto non sia in Transvaal. Le selci di Gunflint paiono essere precipitate e consolidate intorno a un sottostante basamento roccioso, composto da conglomerati di grossi ciottoli di ofioliti (pietre verdi) e altri elementi piú piccoli, che si ritiene siano rimasti senza interruzione in ambiente subacqueo durante la sedimentazione. Sulla superficie dei ciottoli si svilupparono « domi » di alghe, visibili anche a occhio nudo nei campioni di rocce di Gunflint. Sui domi crebbero verticalmente colonie di alghe, che appaiono ora come strati alternati di quarzo a cristalli grossolani e di selce nera a grana piú fine.

Negli anni cinquanta ebbi la fortuna di collaborare con Stanley A. Tyler nella raccolta e nello studio di campioni delle selci di Gunflint. Solo pochi studi preliminari sui campioni della zona di Schreiber e pochi altri videro la luce prima della morte di Tyler, ma già a quel tempo entrambi eravamo certi che, grazie al suo lavoro, la storia della vita sulla Terra si era arricchita di un nuovo capitolo, riguardante un gruppo completamente nuovo di organismi fotosintetici primitivi, la cui esistenza non era mai stata sospettata. In effetti, malgrado si siano dedicati già parecchi anni di ricerche agli organismi di Gunflint, questa formazione continua a fornirci nuovi esemplari. Fino a oggi sono stati descritti ben otto diversi generi, comprendenti 12 specie, eppure tra le illustrazioni di questo articolo sono rappresentate alcune nuove forme non ancora classificate.

Le forme piú abbondanti tra i microfossili di Gunflint sono costituite da strutture filamentose. La maggior parte di queste hanno un diametro compreso tra 0,6 e 1,6 micron, ma in alcuni casi superano i 5 micron. La lunghezza è variabile, fino a un massimo di diverse centinaia di micron. Alcuni di questi filamenti presentano delle pareti interne, perpendicolari al senso della lunghezza, altri ne sono privi. Tali pareti possono avere spessore diverso. Questi organismi primitivi sono stati attribuiti, in base alla loro morfologia, a quattro generi che comprendono cinque specie. Essi sono simili all'alga azzurra filamentosa attuale *Oscillatoria* e alle specie affini. Uno dei quattro generi è invece simile all'attuale *Crenotrix*, un batterio che ossida il ferro.

Tra gli organismi di Gunflint si trova un altro genere caratterizzato da forme sferoidali, di diametro variabile tra 1 e piú di 16 micron. La parete di queste cellule varia assai sia per lo spessore, sia per la struttura. In base a questi caratteri sono state istituite tre diverse specie comprese tutte nel genere *Huroniospora*.

Quali tipi di organismi corrispondevano a queste forme sferoidali? Possiamo basarci solo sulla loro forma per stabilirlo. Come le forme similari

rinvenute nelle selci molto piú antiche di Fig Tree, potrebbero essere delle alghe azzurre non coloniali. Potrebbero essere anche spore prodotte dalle alghe filamentose sopra descritte e in qualche caso potrebbero essere anche spore di ferro-batteri. C'è anche la possibilità che siano i corpi fossilizzati di organismi che nuotavano liberamente nell'acqua mediante flagelli, che non si sono conservati. Ulteriori studi permetteranno forse di poterli meglio classificare.

I restanti generi rinvenuti nella formazione di Gunflint sono stati descritti e studiati in maniera molto approfondita e presentano tutti caratteristiche veramente insolite. Un genere comprende organismi a forma di stella, costituiti da filamenti raggiati. Il diametro di questa forma varia tra gli 8 e i 25 micron, in qualche raro esemplare i filamenti sono ramificati. Benché il numero degli esemplari sia scarso ed essi siano generalmente mal conservati, il genere è diffuso in tutte le selci di Gunflint.

Il genere è stato denominato *Eoastrion*, nome che descrive la caratteristica forma di questi esemplari e ne sottolinea l'antichità. Esso è stato diviso in due specie, una comprendente le forme con filamenti non ramificati e l'altra quelle con le ramificazioni. Non sono state riscontrate chiare analogie tra queste forme e quelle attuali, benché, sotto certi aspetti, il genere *Eoastrion* sia simile a strani batteri che ossidano il ferro e il manganese, denominati *Metallogenium personatum*. Un altro genere comprende organismi ancora piú particolari. Essi si trovano con abbondanza nelle selci che affiorano presso le cascate di Kakabeka, a circa 25 chilometri a ovest da Thunder Bay. Hanno la forma di un bulbo con un sottile gambo, alla cui sommità si trova una struttura che in molti casi assomiglia a un ombrello. Le dimensioni delle tre parti che compongono questo organismo variano molto da esemplare a esemplare; generalmente il bulbo con il gambo o l'ombrello misurano dai 10 ai 30 micron.

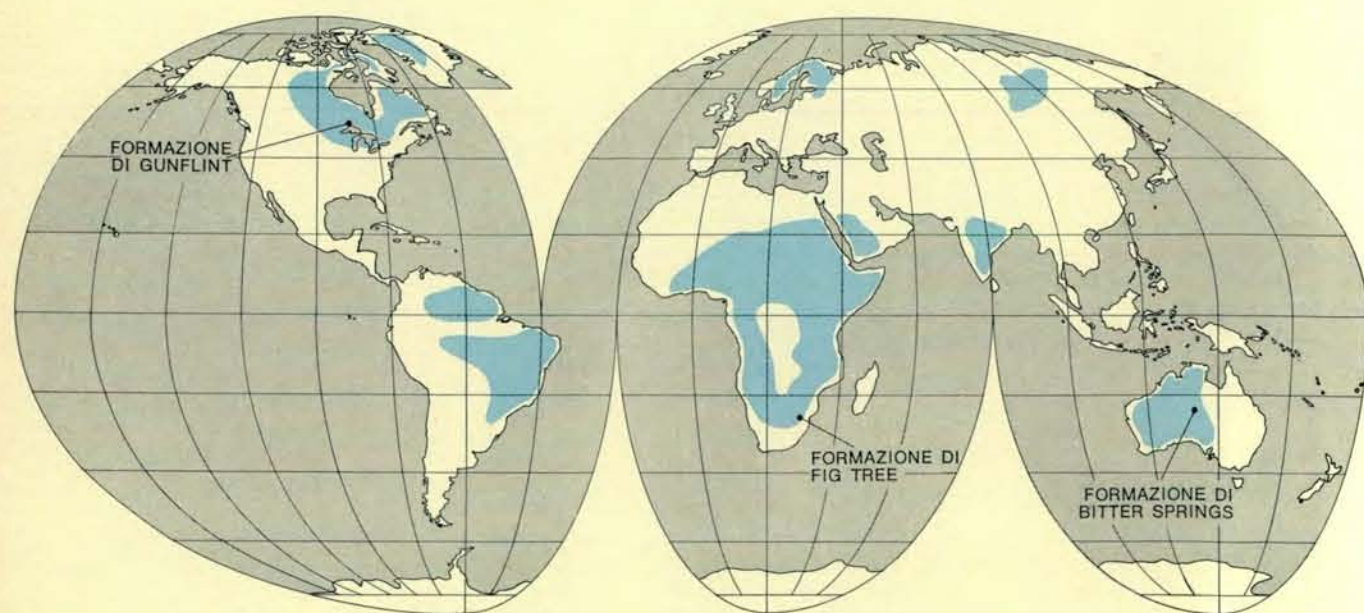
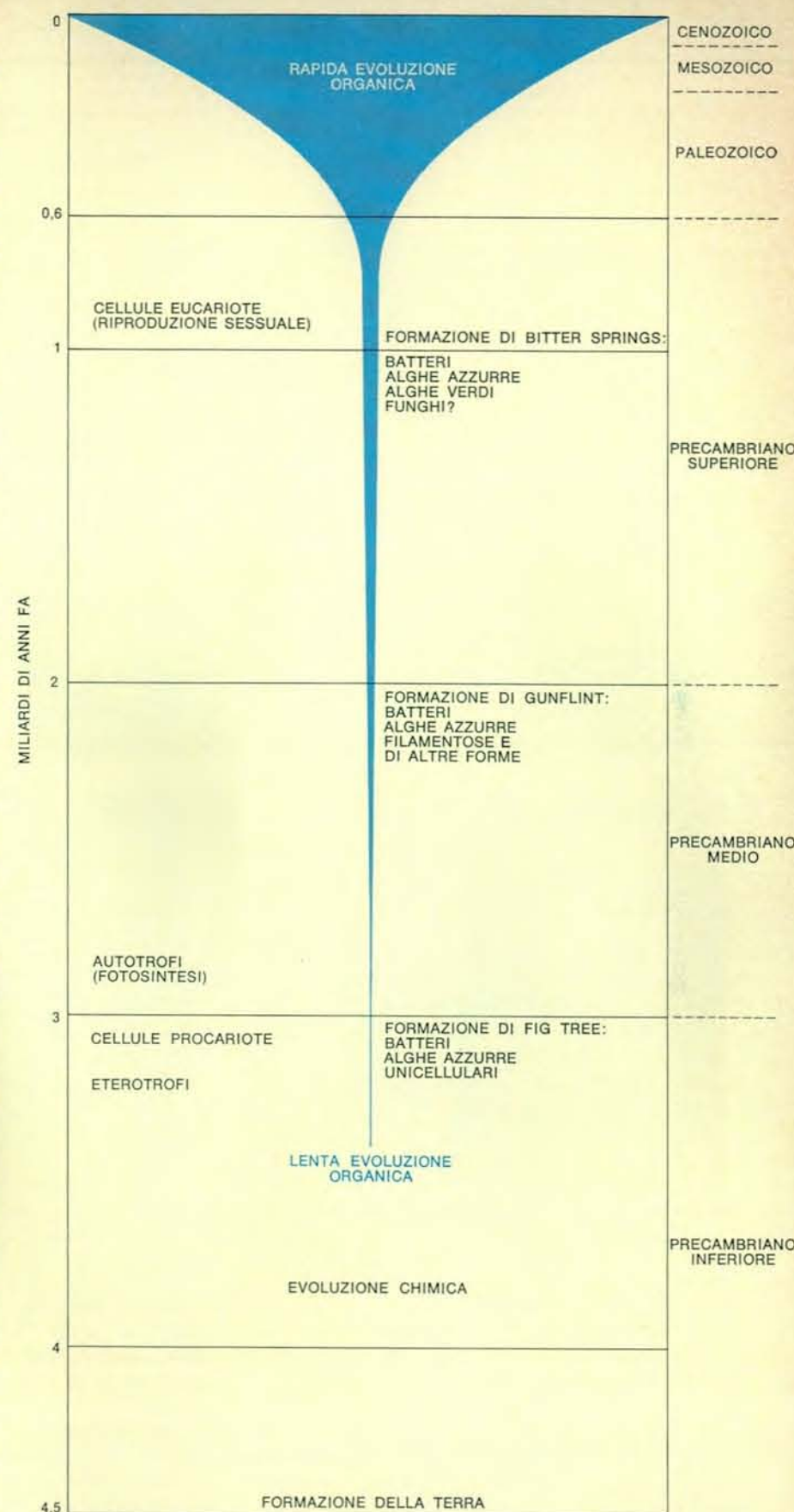
Per questa forma è stato istituito il genere *Kakabekia* e la specie è stata denominata *umbellata*, a causa della caratteristica forma.

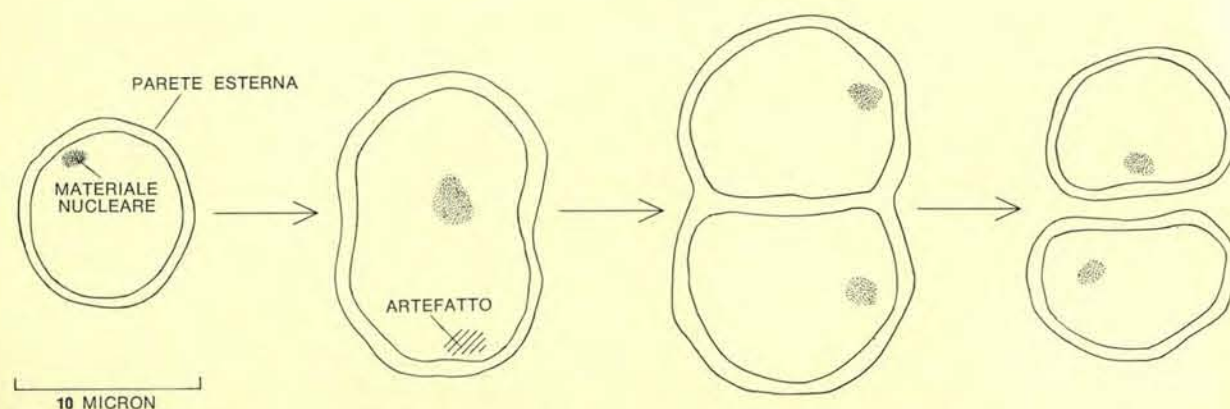
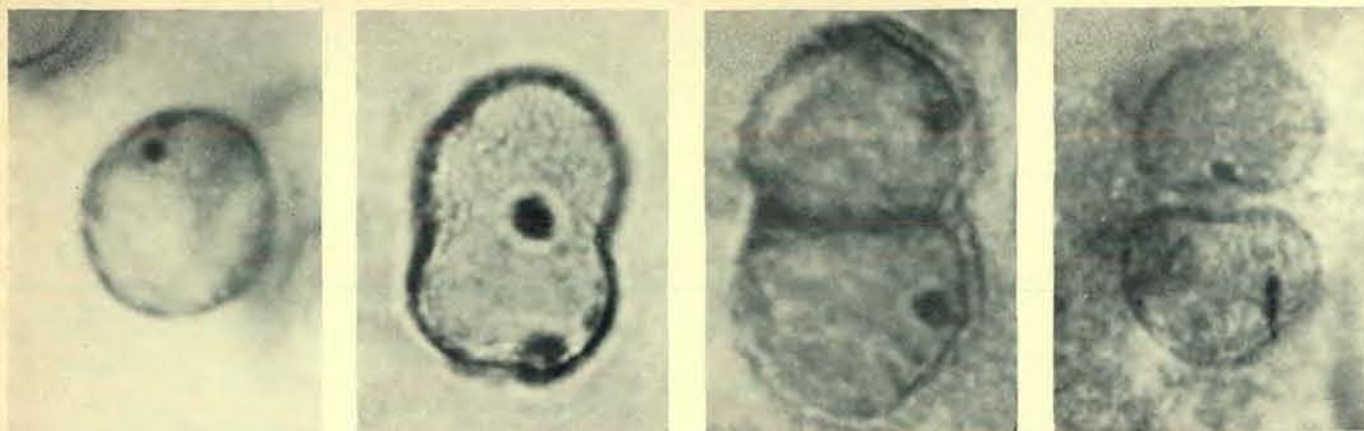
La storia del genere *Kakabekia*, presenta aspetti piuttosto controversi e vale la pena di raccontarla. Nel 1954, in una ricerca del tutto indipendente dagli studi paleontologici condotti sui fossili di Gunflint, Sanford M. Siegel, scoprí una strana nuova forma vivente, mentre studiava i microrganismi che vivono nel suolo in condizioni atmosferiche limite. Fu impossibile attribuire gli organismi rinvenuti alle specie fino allora conosciute. Siegel dopo averne eseguito microfotografie e disegni, li mise da parte considerandoli un enigma. Alcuni mesi piú tardi, fu pubblicata una descrizione del genere *Kakabekia* e Siegel notò immediatamente la somiglianza tra i suoi organismi misteriosi e alcuni esemplari di Gunflint. Le forme studiate da Siegel avevano accrescimento molto lento, non contenevano clorofilla e apparentemente non avevano nucleo; potevano dunque rappresentare un nuovo gruppo di organismi procarioti. Che essi siano affini alla specie vissuta circa due miliardi di anni fa, è difficile da provare, si tratta comunque di una straordinaria coincidenza nel corso dell'evoluzione.

Gli esemplari dell'ottavo genere rinvenuto a Gunflint provengono tutti da una ristretta area in prossimità degli affioramenti piú orientali di selci vicino a Schreiber Beach. Si tratta di una forma costituita da due sfere concentriche il cui diametro esterno varia tra i 28 e i 32 micron. Nella maggior parte degli esemplari, tra la sfera interna e quella esterna vi sono dodici corpiccioli sferici. Ho attribuito questi organismi al nuovo genere *Eosphaera* e alla specie *tyleri* in onore di Tyler. Non si conosce alcun organismo attuale che possa somigliare all'*Eosphaera* e neppure in altre rocce precambriane sono state rinvenute forme simili a questa. L'*Eosphaera* potrebbe essere un « errore » evolutivo che non sopravvisse oltre la metà del Precambriano.

Si hanno validi motivi per ritenere che gli organismi rinvenuti nelle selci di Fig Tree e che risalgono a 3 miliardi di anni fa non fossero capaci di fotosintesi. È probabile invece che le forme di Gunflint, di un miliardo di anni piú recenti, fossero fornite di clorofilla. Per prima cosa, le analisi chimiche eseguite sulle selci di Gunflint hanno rivelato, tra le altre sostanze organiche, due « fossili chimici », gli idrocarburi pristano e fitano, che si possono ritenere derivati dalla decomposizione della clorofilla. Un secondo dato a favore di questa ipotesi è la notevole somiglianza tra le forme filamentose, che sono le piú abbondanti tra i fossili di Gunflint, e le attuali alghe azzurre capaci di fotosintesi. Una terza prova è fornita dai piccoli domi rinvenuti a Gunflint, molto simili alle analoghe costruzioni realizzate dalle attuali alghe fotosintetiche nelle acque poco profonde.

Inoltre tra i residui di sostanza organica di Gunflint sono relativamente abbondanti gli isotopi non radioattivi del carbonio: carbonio 12 e 13. Il carbonio contenuto nell'anidride carbonica atmosferica è per il 99 per cento carbonio 12 e per l'uno per cento carbonio 13. Attraverso il processo della fotosintesi, tuttavia, le piante tendono a fissare il carbonio 12 in proporzione maggiore, in modo che i tessuti vegetali contengono meno dell'uno per cento dell'isotopo piú pesante. Le misurazioni delle percentuali dei due isotopi nei residui organici di Gunflint sono state eseguite da Thomas C. Hoering del Laboratorio di Geofisica della Carnegie Institution di Washington. I risultati indicano che i materiali di Gunflint hanno la stessa proporzione tra carbonio 12 e 13 che si rinviene nelle moderne alghe e nelle altre piante dotate di fotosintesi. Il materiale rinvenuto a Fig Tree, piú vecchio di un miliardo di anni, presenta circa lo stesso rapporto tra i due isotopi riscontrato in quello di Gunflint. Questo risultato ci indurrebbe a ritenere che anche gli organismi simili ad alghe di Fig Tree fossero capaci di fotosintesi. Sembra probabile che, anche se l'ossigeno era solo un elemento molto scarso ai tempi della deposizione dei materiali di Fig Tree, sicuramente gli organismi fioriti nel successivo periodo di Gunflint, permisero all'ambiente di arricchirsi di ossigeno, portandolo a livelli ottimali per la vita, verso la fine del Precambriano. Questo fu un avvenimento di notevole importanza, ma non il piú importante avvenuto in quel periodo. La varietà di forme (probabilmente associata anche a una varietà di funzioni) dimostrata dagli otto diversi generi presenti nel Gunflint dimostra che la vita sulla Terra aveva superato il secondo gradino di vitale importanza per l'evoluzione: quello della diversificazione, non meno di due miliardi di anni fa.

Il superamento del terzo gradino è chiaramente documentato da una serie di sedimenti precambriani costituiti prevalentemente da calcari, arenarie

Le rocce precambriane sono distribuite nelle aree centrali dei vari continenti, naturalmente entro gli strati piú profondi e piú antichi. Generalmente, essendosi formate per accumulo dei sedimenti, sono state talmente alterate dal calore e dalla pressione, che in esse è scomparsa ogni traccia di fossili. Tuttavia vi sono alcuni affioramenti relativamente ben conservati che contengono molti organismi. Nella figura sono segnate le tre formazioni precambriane che hanno fornito i fossili piú importanti.

In questo schema l'evoluzione organica viene presentata come una serie di successive conquiste biologiche. La Terra si formò 4,5 miliardi di anni fa e tutto il periodo che intercorre tra quell'epoca e l'era Paleozoica, iniziata 600 milioni di anni fa, va sotto il nome di Precambriano. L'incremento delle specie è indicato in colore. Quando si svilupparono i primi organismi eucarioti, forniti di nucleo e capaci di riprodursi sessualmente, alla fine del Precambriano, il numero di specie aumentò in maniera esplosiva.

Nelle selci di Bitter Springs, che risalgono a un miliardo di anni fa, è stata osservata la divisione cellulare di un organismo eucariota, un'alga verde del genere *Glenobotrydion*. J.W. Schopf ha ricostruito il processo (*nei disegni*) studiando i fossili in cui gli organismi apparivano nei vari stadi di divisione (*microfotografie*). L'esistenza di alghe così evolute dal punto di vista biologico dimostra che il primo passo verso la riproduzione sessuale e la variabilità genetica era avvenuto molto tempo prima.

e dolomie, rinvenuti lungo il margine nord dell'Amadeus Basin nell'Australia settentrionale. La formazione di Bitter Springs, che appartiene alla successione stratigrafica di questa regione affiora in alcuni rilievi della zona di Ross River, a circa 60 chilometri da Alice Springs. I livelli esposti sono quelli medio-inferiori della formazione e comprendono strati di selci nere compatte e rocce finemente scistose associate con depositi di alghe coloniali.

Non si conosce l'età assoluta della formazione di Bitter Springs. I suoi strati piú alti, tuttavia, si trovano circa 1300 metri al di sotto di quei livelli che, nel territorio di Ross River costituiscono il limite tra i terreni appartenenti al Precambriano e al Cambriano. Si è concordi nel ritenere che il Cambriano sia iniziato 600 milioni di anni fa, dunque le selci di Bitter Springs che si trovano molto piú in basso delle rocce cambriane, devono essere molto piú antiche di esse. La formazione di Bitter Springs si trova inoltre al di sotto di sedimenti precambriani, che sono stati datati in base al loro contenuto di rubidio-stronzio, rivelando un'età di 820 milioni di anni. Penso che si possa calcolare per le selci di Bitter Springs l'età di un miliardo di anni. Ho raccolto campioni nel territorio di Ross River nell'aprile del 1965 e li ho uniti ai campioni di Fig Tree per studiarli insieme a Schopf durante l'estate.

Un'analisi preliminare degli abbondanti microfossili di Bitter Springs indica che nelle acque poco profonde che coprivano queste regioni dell'Australia centrale alla fine del Precambriano, vivevano almeno quattro gruppi di piante inferiori. Tra queste vi erano alghe azzurre filamentose affini alle attuali *Nostoc* e *Oscillatoria*. Alcune di esse avevano una lunghezza di 75 micron; erano piú sottili al centro (circa 1,4 micron) e appuntite alla sommità (diametro inferiore a un micron).

In seguito a uno studio preliminare, gli altri tre gruppi si dimostrarono particolarmente interessanti. In base alle strutture interne, che si erano conservate, fu possibile stabilire che si trattava di vari tipi di alghe verdi. Queste, diversamente dalle alghe azzurre, sono costituite da cellule eucariote. Dunque le selci di Bitter Springs sembrano contenere la piú antica prova fossile che un organismo potenzialmente capace di riproduzione sessuale o almeno fornito di nucleo, si era finalmente evoluto.

Schopf terminò la sua analisi piú dettagliata del materiale di Bitter Springs nel 1968 e concluse che esso conteneva tre specie di organismi simili a batteri, 20 diverse forme appartenenti piú o meno sicuramente alle alghe azzurre, due generi di alghe verdi, due possibili specie di funghi e due forme di difficile classificazione. Di una delle alghe verdi, *Glenobotrydion aenigmatis*, per una insolita coincidenza si trovarono numerosi esemplari fossilizzati durante le varie fasi della divisione mitotica. Disponendo questi esemplari in sequenza fu possibile osservare l'intero processo di riproduzione (*si veda l'illustrazione in questa pagina*).

La sicura apparizione di un'organizzazione cellulare eucariota a questo punto della storia della Terra offre una valida spiegazione a uno dei principali problemi dell'evoluzione: come mai non si hanno resti fossili di organismi superiori fino a quando non trascorsero i sette ottavi delle ere geologiche? La domanda è molto interessante, soprattutto alla luce di quello che sappiamo a proposito dell'esistenza di animali pluricellulari e di alghe superiori all'inizio dell'era Paleozoica.

Fino a pochi anni fa, si riteneva che la scarsità di organismi evoluti prima del Cambriano, dipendesse dalla poca disponibilità di ossigeno sia nell'atmosfera che nell'idrosfera. Dovette trascorrere molto tempo prima che organismi procarioti si abituassero a vivere in un ambiente che cominciava a contenere questo elemento altamente reattivo. Fu necessario anche molto tempo perché sufficiente ossigeno passasse dall'idrosfera (dove veniva prodotto dalle alghe attraverso la fotosintesi) all'atmosfera dove andava costituendo uno schermo di ozono (O_3) tra la superficie della Terra e le radiazioni ultravioletto emanate dal sole. Fino a che non si formò questo schermo, né le acque superficiali, né il terreno furono abitabili.

Un ambiente povero di ossigeno fu sicuramente il maggior ostacolo allo sviluppo di organismi eterotrofi ossigeno-dipendenti. Ma oltre alle prove sopra riportate della presenza di ossigeno nelle formazioni precambriane, numerosi recenti studi hanno dimostrato che nell'atmosfera della Terra si era accumulato abbastanza ossigeno per costituire uno schermo di ozono, già molto prima della fine del Precambriano. La presenza di cellule eucariote verso la fine del Precambriano, testimoniata dalle alghe verdi contenute nella formazione di Bitter Springs, fornisce una migliore spiegazione del fatto che gli organismi superiori apparvero solo molto piú tardi. La chiave fondamentale del processo evolutivo è la variabilità genetica. La riproduzione sessuale, che produce un rimescolamento dei caratteri ereditari, è il processo che permette agli individui di variare e di conseguenza porta all'apparire, nel corso dell'evoluzione, di una complessità di forme e di funzioni a tutti i livelli di organizzazione.

Il superamento di quest'ultimo gradino evolutivo, che separa le forme di vita costituite da cellule prive di nucleo dalle forme capaci di riproduzione sessuale, deve essere avvenuto molto tempo prima della deposizione delle selci di Bitter Springs. Solo circa mezzo miliardo di anni fa, i mari del Paleozoico erano abitati da piante altamente differenziate e animali evolutisi da antenati che avevano superato tutti e tre i gradini evolutivi durante il Precambriano. Mezzo miliardo di anni non ci sembra sufficiente per il superamento di tappe cosí importanti; inoltre si hanno prove che dimostrano che questa evoluzione era già in atto quando vennero deposti i sedimenti di Gunflint.

Le selci di Fig Tree, di Gunflint e di Bitter Springs non sono le uniche fonti di fossili precambriani, né Tyler, Schopf e io siamo i soli che si sono dedicati a queste ricerche. In realtà è quasi un secolo che si lavora in questo campo. Negli ultimi anni però si sono presi in considerazione fatti diversi da quelli che venivano tradizionalmente usati per stabilire il limite tra Precambriano e Paleozoico. Come noi, molti colleghi di altri paesi sperano di ottenere importanti informazioni dallo studio della organizzazione cellulare. Questo tipo di ricerca richiede osservazioni sia macroscopiche, sia al microscopio elettronico. Si cercano con questi mezzi ulteriori graduali passaggi evolutivi, che si possono mettere in evidenza attraverso le strutture interne, quando queste si sono conservate. La quantità di reperti del Precambriano è ancora molto scarsa, ma si stanno colmando numerose lacune. In realtà il concetto tradizionale di un Precambriano ben delimitato sta gradualmente scomparendo, man mano che la storia della vita sulla Terra viene ricostruita.

Due osservazioni finali possono interessare coloro che, come me, non si stancano di voler risalire alle cause prime, anche se spesso le loro domande restano senza risposta. Alcuni biologi attualmente ritengono che gli organelli che caratterizzano le cellule eucariote si siano sviluppati inizialmente come organismi indipendenti che, in qualche caso, si sono adattati a vivere simbioticamente entro determinate cellule ospiti. Non si sa se una delle reazioni della cellula ospite sia stata proprio quella di riunire in un nucleo tutto il materiale genetico proveniente dal citoplasma dell'organismo ospitato. Se la simbiosi è stato il primo passo verso l'evoluzione di una cellula eucariota, probabilmente gli organismi rinvenuti nei sedimenti di Gunflint dovrebbero contenere la prova di questa evoluzione in atto (*si veda l'illustrazione centrale a destra a pagina 12*). Una interessante descrizione di questa trasformazione di vari organismi tipo batteri e alghe negli organelli di cellule eucariote è stata fatta da Lynn Margulis dell'Università di Boston in un suo recente libro. L'autrice, a dimostrazione della sua teoria, porta argomenti biologici; lo studio sempre piú dettagliato dei fossili precambriani sembra confermare la sua teoria.

Astronomi e fisici hanno potuto provare recentemente che alcune molecole quali il gruppo ossidrile (OH), l'ossido di carbonio (CO), l'ammoniaca (NH_3), l'acido cianidrico (HCN) e la formaldeide (HCHO) si sono formate in quello che era ritenuto spazio « vuoto ». Le piú recenti scoperte sulla complessità interstellare riguardano la sostanza organica rinvenuta da alcuni ricercatori in un determinato gruppo di meteoriti noti come condriti carboniose. Finora non è stato possibile esaminare alcuna condrite in condizioni tali da escludere la possibilità di una contaminazione accidentale con la sostanza organica terrestre. Non si è ancora riusciti quindi a trovare una risposta alla presenza di amminoacidi (i quali, come si sa, rappresentano gli elementi indispensabili per lo svilupparsi della vita). Recentemente, tuttavia, utilizzando tecniche di laboratorio estremamente rigorose per esaminare campioni della condrite Murchison (caduta nell'Australia meridionale nel settembre 1969), Ponnamperuma e i suoi collaboratori dell'Ames Research Center (in collaborazione con Carleton B. Moore dell'Università di Stato dell'Arizona e Ian R. Kaplan dell'Università di California a Los Angeles) sembra siano riusciti a dimostrare l'esistenza di amminoacidi extraterrestri. Nella meteorite Murchison si sono trovati amminoacidi in quantità notevole, alcuni dei quali sono sconosciuti tra gli organismi terrestri e dunque non possono essere dovuti a contaminazione.

Queste scoperte aprono nuove prospettive all'evoluzione chimica: processi di sintesi casuali potrebbero essere avvenuti non sulla Terra, ma nello spazio, con la formazione di corpi extraterrestri (di cui le condriti carboniose sarebbero frammenti) estremamente ricchi di sostanze organiche. Questo ci riporta alle considerazioni introduttive dell'articolo. L'evoluzione chimica delle sostanze organiche e le prime forme di vita sulla Terra sembra possano aver avuto origine in qualche altra parte del sistema solare o al di fuori di esso. Per la conoscenza dei primi stadi dell'evoluzione organica i biologi e i palentologi non possono basarsi dunque che sulle osservazioni di chimici e astrofisici.

La rivelazione delle onde gravitazionali

L'esistenza di queste onde è prevista dalla teoria della relatività. Esperimenti progettati per rivelarle hanno messo in evidenza che esse provengono a fiotti dalla direzione del centro della galassia

di Joseph Weber

La teoria generale della relatività prevede che le masse accelerate irraggino onde gravitazionali, cioè campi gravitazionali che si propagano con la velocità della luce. Tali onde sono simili alle onde elettromagnetiche nel senso che esse trasportano energia, quantità di moto e informazioni. Tuttavia, mentre le onde elettromagnetiche interagiscono solo con cariche elettriche e correnti, le onde gravitazionali interagiscono con tutte le forme di energia e di materia.

Fin dal 1958 ho cercato di rivelare tali onde gravitazionali. A tale scopo è stata allestita in due località molto distanti l'una dall'altra (il mio laboratorio all'Università del Maryland e l'Argonne National Laboratory, presso Chicago) un'apparecchiatura progettata in modo particolare. Negli ultimi due anni simultanei aumenti dei segnali di uscita dei rivelatori in questi due luoghi hanno messo in evidenza l'esistenza di fiotti di radiazione gravitazionale proveniente dalla direzione del centro della nostra galassia. Queste scoperte hanno stimolato lo sviluppo di molte teorie e hanno provocato notevoli disaccordi tra gli astrofisici. Tenendo conto di questi fatti, prima descriverò gli esperimenti e poi riassumerò alcune delle spiegazioni che sono state proposte per i sorprendenti risultati finora ottenuti.

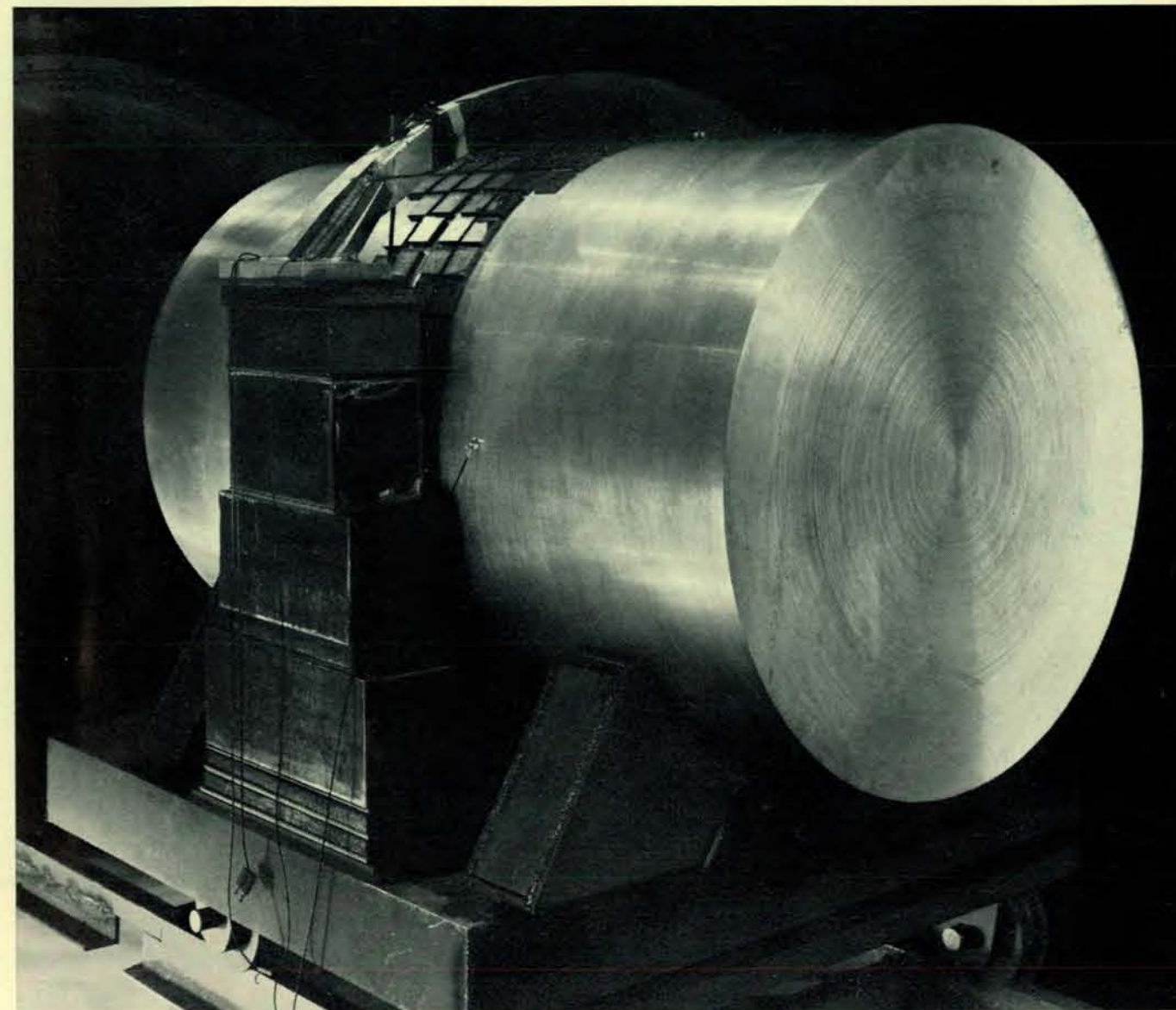
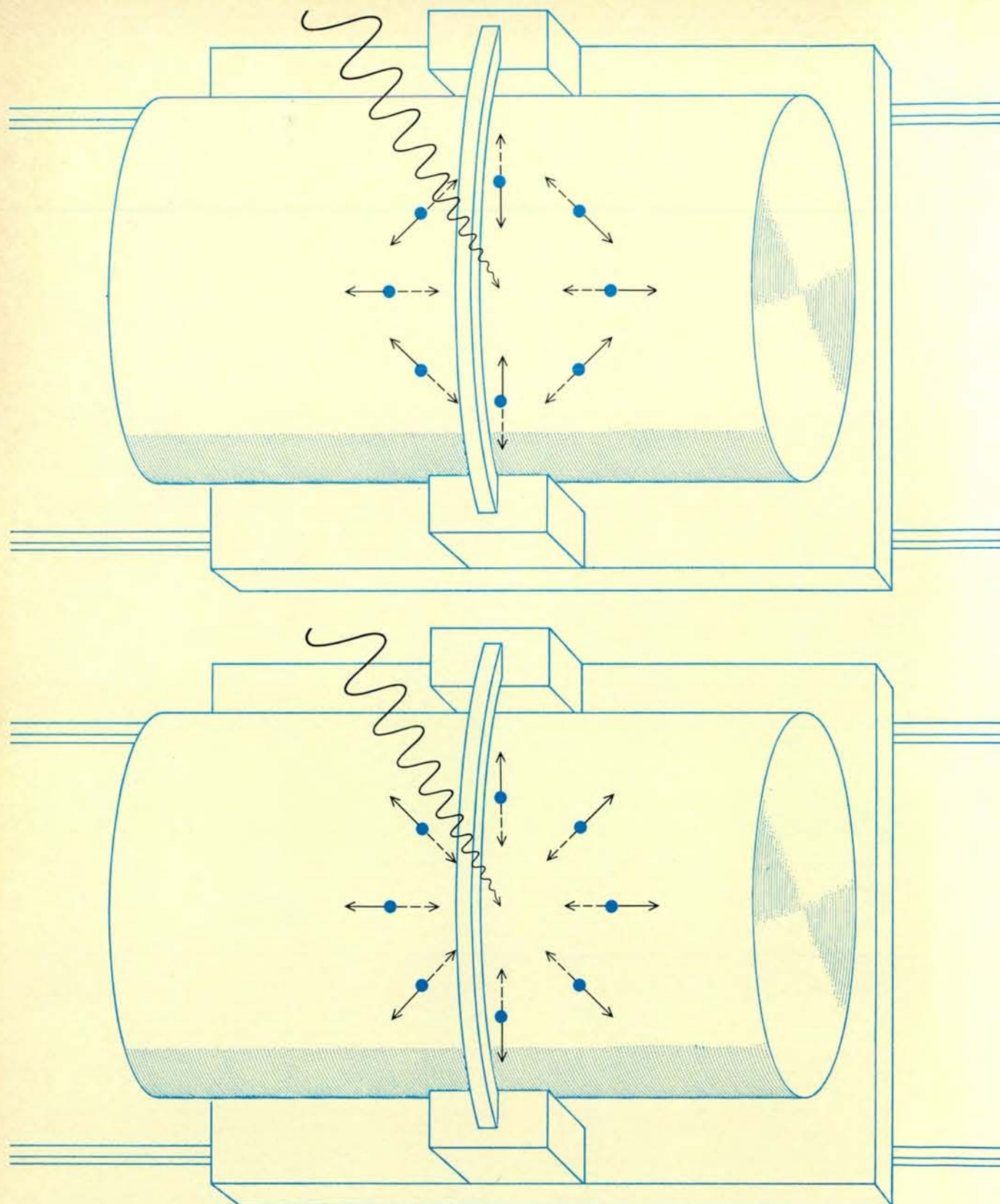
In passato, i nuovi tipi di radiazione venivano studiati producendoli e rivelandoli in laboratorio. Tuttavia, al tempo in cui iniziai i miei esperimenti, nessuno sapeva come generare o rivelare la radiazione gravitazionale in laboratorio. È vero che i processi mediante i quali un atomo o una molecola emettono luce implicano l'accelerazione di particelle dotate di massa (elettroni) e che queste particelle dovrebbero in linea di principio generare anche radiazione gravitazionale. Il guaio è che il rapporto tra la carica elettrica e la massa è per un elettrone estremamente grande. Questo fatto, tenendo conto anche del piccolo valore della costante gravitazionale, significa che dovrebbe essere emesso da un atomo o da una molecola un solo gravitone (il quanto della radiazione gravitazionale) per ogni 10^{43} fotoni (quanti di luce) emessi. Inoltre la probabilità che un singolo atomo o molecola interagisca con un gravitone incidente è estremamente piccola e quindi i dispositivi di rivelazione basati sul verificarsi di tali interazioni casuali individuali erano da scartarsi a priori.

Di conseguenza avevo deciso fin dall'inizio di cercare la radiazione gravitazionale emessa da masse grandissime – dell'ordine di quelle delle stelle o delle galassie – con rivelatori costituiti da un gran numero di atomi eccitati in modo coerente, come un'unica struttura anziché singolarmente. In quell'epoca non si aveva alcuna informazione sulle sorgenti di radiazione gravitazionale. Ciò nonostante sembrava ragionevole indagare sulle possibili tecniche di rivelazione e iniziare la ricerca. È evidente che la probabilità di successo in queste condizioni doveva essere considerata molto piccola, confrontabile forse con la probabilità di scoprire i pulsar con i radioricevitori di cui si poteva disporre all'inizio di questo secolo. La prima cosa necessaria era trovare un'antenna adatta alla radiazione gravitazionale. Riuscii a dimostrare, su basi tecniche, che le onde gravitazionali potevano eccitare vibrazioni interne in un solido elastico; perché vi fosse una risposta in risonanza, le frequenze acustiche naturali del solido dovevano coincidere con la frequenza delle onde gravitazionali. Il centro di massa di un siffatto rivelatore poteva essere considerato come se fosse in caduta libera sotto l'azione dell'onda gravitazionale; le altre parti del rivelatore sarebbero state in qualsiasi istante influenzate in modo diverso dall'onda e avrebbero quindi subito lievissimi spostamenti rispetto al centro di massa, instaurando delle vibrazioni interne nel solido. Una dettagliata analisi ha mostrato che un rivelatore di onde gravitazionali costruito su questo principio doveva essere in grado di misurare le onde gravitazionali (e quindi la curvatura dello spazio-tempo) previste dalla teoria della relatività. Ciò che ne seguí fu lo sviluppo di una tecnica completamente nuova per la misura di campi dinamici gravitazionali.

La sensibilità di qualsiasi rivelatore di radiazione gravitazionale dovrebbe essere proporzionale sia alla massa sia alle sue dimensioni. La piú grande massa solida che si possa usare come rivelatore è la Terra stessa. I modi liberi di oscillazione della Terra erano stati identificati dopo il grande terremoto del Cile nel maggio 1960: frequenze tipiche iniziavano da un ciclo ogni 54 minuti per raggiungere valori piú alti. Per poter attrezzare la Terra come rivelatore di radiazione gravitazionale, viene registrata continuamente l'accelerazione sulla superficie terrestre mediante un gravimetro. Si esegue poi un'analisi armonica per vedere se viene eccitata qualcuna delle frequenze naturali della Terra. Sfortunatamente il « rumore di fondo » vibrazionale della Terra, dovuto principalmente a perturbazioni sismiche e meteorologiche, è piuttosto alto. Perciò, anche se si riuscisse a registrare l'eccitazione di uno dei modi liberi di oscillazione della Terra, non si potrebbe dire in alcun modo se essa è stata causata da onde gravitazionali o da qualche altra perturbazione naturale.

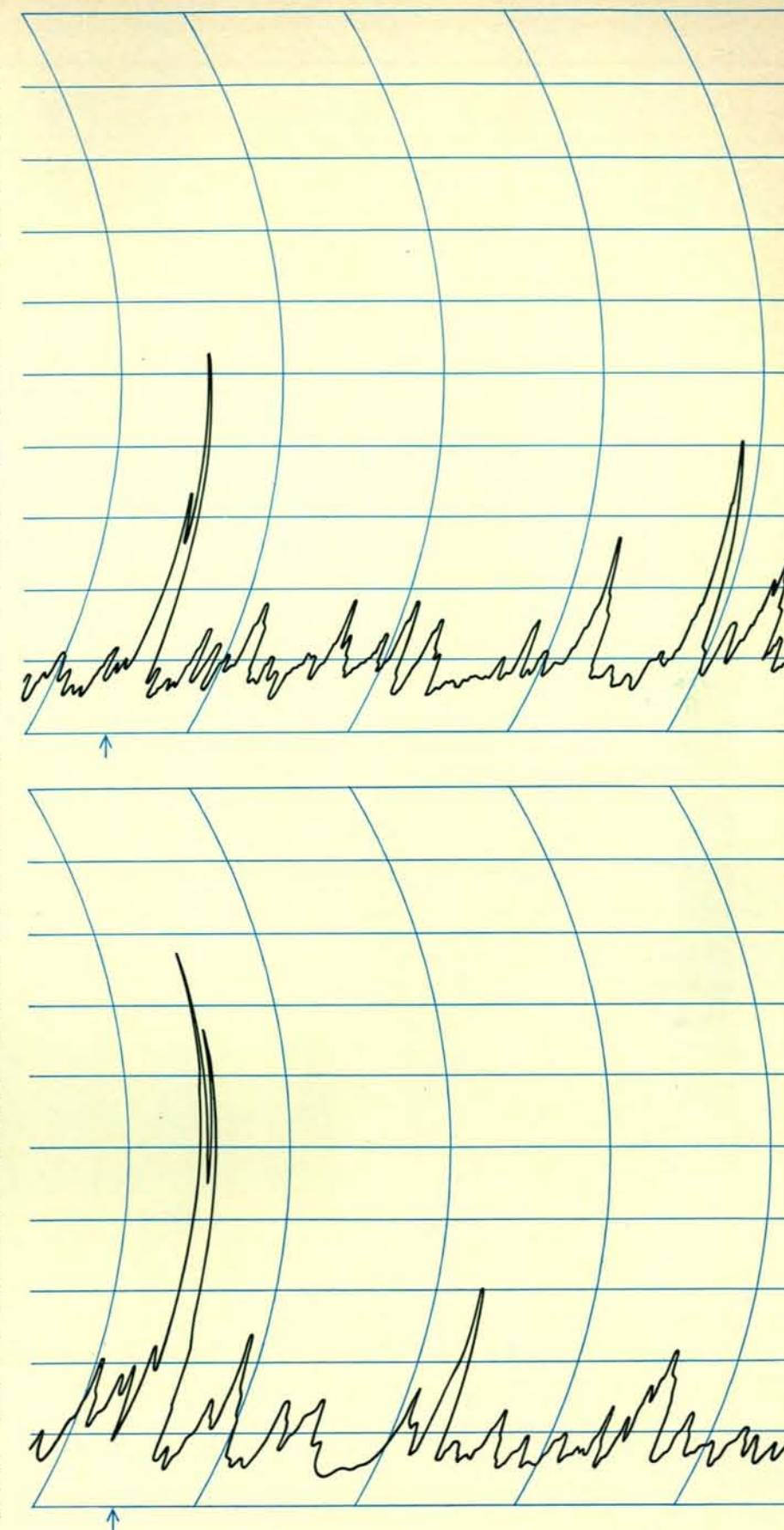
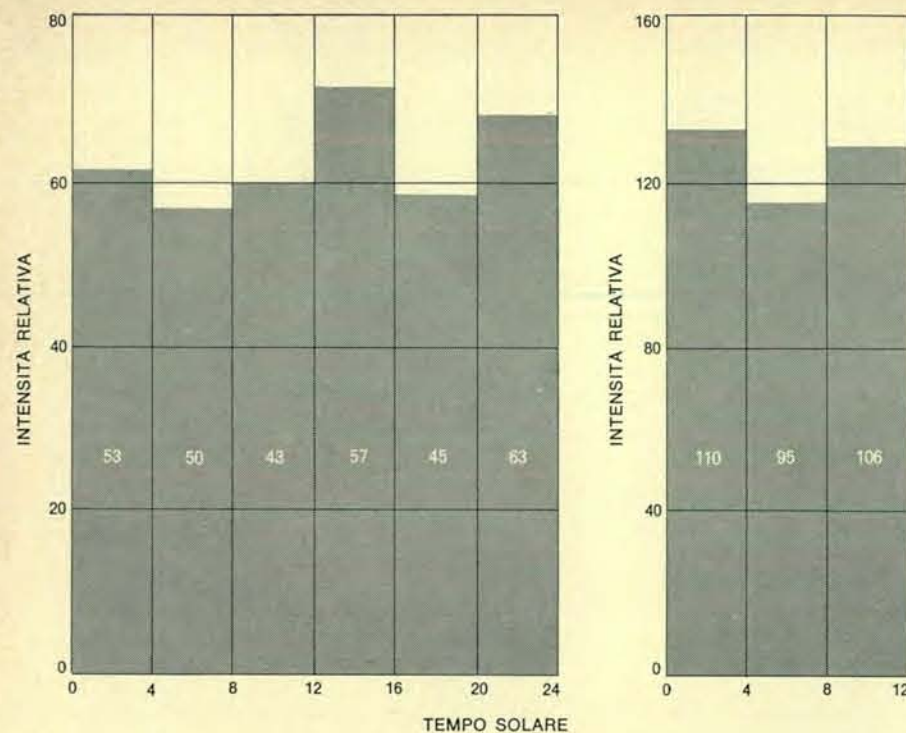
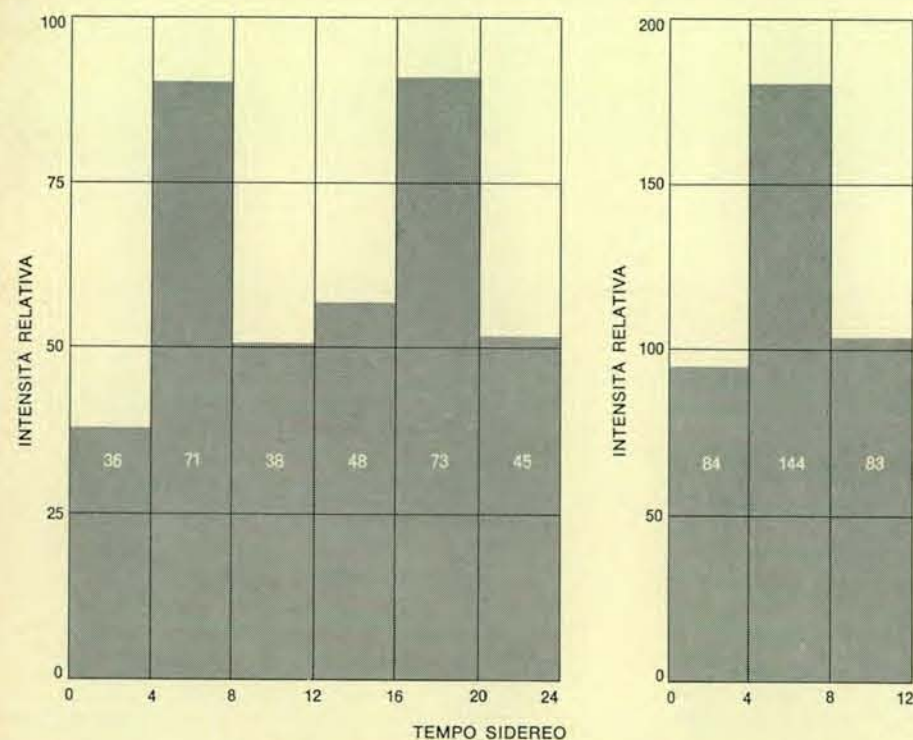
È attualmente in progetto da parte della NASA un esperimento nel quale si prevede di impiegare la Luna come rivelatore. Un gravimetro adatto allo scopo verrà installato sulla superficie lunare dagli astronauti dell'*Apollo 17*.

Nel frattempo i tentativi di rivelare le onde gravitazionali continueranno a essere limitati alle masse di dimensioni da laboratorio, cioè dell'ordine delle tonnellate. Tali masse possono essere portate a un alto grado di isolamento dalle perturbazioni sismiche e elettromagnetiche dell'ambiente circostante; in queste condizioni la principale fonte di rumore di fondo è il bombardamento casuale del rivelatore da parte delle molecole d'aria. Le vibrazioni interne di una massa solida di tale grandezza corrispondono a frequenze di eccitazione dell'ordine di uno o piú chilohertz (migliaia di cicli al secondo). È risultato che questo intervallo di frequenze è molto promettente per la ricerca, perché ci si aspetta che una stella simile al Sole che abbia consumato tutto il suo combustibile nucleare e sia prossima a un collasso gravitazionale emetta radiazione gravitazionale proprio nella banda dei chilohertz. Se una siffatta stella aveva in origine anche una piccola rotazione, il suo momento angolare si deve mantenere costante fino alle ultime fasi del collasso; nello stesso tempo la velocità periferica della stella comincia a crescere fino a raggiungere la velocità della luce. A questo punto la stella può deformarsi o scoppiare irraggiando la sua energia e la sua quantità di moto sotto forma di onde gravitazionali le cui frequenze sono tipicamente nella regione del chilohertz.

Infine uno dei rivelatori progettato e costruito sulla base di queste considerazioni consiste essenzialmente di un cilindro di alluminio di circa 90 centimetri di diametro e 1,5 metri di lunghezza e pesa circa 3,5 tonnellate (*si veda la figura qui sotto*). Dei cristalli pie-

Il rivelatore di radiazione gravitazionale fotografato nel laboratorio dell'autore all'Università del Maryland. Il cilindro di alluminio che costituisce l'ossatura del dispositivo misura circa 90 centimetri di diametro e un metro e mezzo di lunghezza e pesa tre tonnellate e mezzo. I piccoli blocchi fissati sulla superficie attorno al centro del cilindro sono cristalli piezoelettrici, che generano un segnale di tensione in conseguenza delle vibrazioni interne che sono dello stesso tipo di quelle che dovrebbero essere eccitate dal passaggio di un'onda gravitazionale. L'apparecchiatura sperimentale è sensibile a variazioni di lunghezza del cilindro dell'ordine di un centesimo del diametro di un nucleo atomico. Il cilindro è appeso a un cavo di acciaio teso tra due pilastri di ferro ed è normalmente rinchiuso in una camera a vuoto. Negli esperimenti di coincidenza a grande distanza il sistema funziona in connessione con un identico rivelatore installato a circa 1000 chilometri di distanza.

Le vibrazioni interne dovrebbero essere eccitate all'interno di un cilindro di alluminio da un'onda gravitazionale incidente, purché la frequenza naturale di oscillazione acustica del cilindro coincida con la frequenza della radiazione gravitazionale. Dal punto di vista teorico la radiazione gravitazionale potrebbe essere di due diversi tipi. Secondo il punto di vista puramente tensoriale (*in alto*) le onde dovrebbero eccitare un gruppo di particelle (*cerchietti colorati*) all'interno del rivelatore facendole oscillare secondo un complesso schema a quadrupolo; le frecce nere continue indicano la distribuzione delle forze sulle particelle in un dato istante, mentre le frecce tratteggiate indicano le stesse forze dopo mezzo ciclo. Tali onde gravitazionali dovrebbero presentare due stati di polarizzazione indipendenti, uno corrispondente all'orientazione dei vettori forza qui mostrata e l'altro corrispondente a una rotazione di 45 gradi del diagramma vettoriale. Secondo la teoria scalare della gravitazione (*in basso*) dovrebbe venire eccitata una distribuzione di forze del tutto differente; le particelle dovrebbero essere tutte spinte verso l'esterno in un dato istante e verso l'interno dopo mezzo ciclo. I rivelatori a forma cilindrica costruiti secondo questo progetto non sono in grado di determinare da soli se le onde gravitazionali osservate sono di natura tensoriale o scalare.

zoelettrici (cioè dei cristalli che rispondono elettricamente a uno sforzo meccanico) posti attorno al centro del cilindro generano un segnale di tensione ogni volta che sono sottoposti a vibrazioni interne. La sensibilità di questa apparecchiatura è tale da poter registrare deformazioni del cilindro corrispondenti a una parte su 10^{16}, pari a circa un centesimo del diametro di un nucleo atomico per lo spostamento relativo delle facce estreme del cilindro da 1,5 metri! Il rivelatore è fornito di un sistema di sospensione a filo e di filtri acustici per schermarlo dalle perturbazioni esterne. Per poter usare un rivelatore alla volta è stato eseguito un accurato studio del rumore di uscita allo scopo di stabilire se vi sono impulsi piú alti di quelli che si possono prevedere dall'applicazione delle leggi probabilistiche. Per facilitare questa ricerca è conveniente utilizzare due rivelatori in coincidenza allo scopo di individuare aumenti simultanei nel rumore di uscita.

Anche con le piú drastiche misure di isolamento è impossibile proteggere i rivelatori dalle grandi perturbazioni quali fulmini nelle vicinanze, gli intensissimi campi magnetici prodotti da una improvvisa perdita di potenza elettrica o da un grandissimo sciame di particelle cosmiche cariche. Per fortuna tali perturbazioni sono ben poco correlate nelle due posizioni, data la loro grande distanza. Furono perciò installati due rivelatori su una linea di riferimento di circa 1000 km, i cui estremi erano a College Park nel Maryland, e all'Argonne National Laboratory. È stato messo a punto un sistema per la registrazione delle coincidenze: si tratta di un calcolatore in linea che emette un impulso quando il segnale di uscita di un rivelatore attraversa una soglia nel senso positivo; se anche il segnale di uscita del secondo rivelatore attraversa la soglia mentre viene emesso il primo impulso, la sovrapposizione nel tempo dei due impulsi genera un grande segnale di tensione che fa scattare un registratore di coincidenze (*si vedano i diagrammi a destra*). Un circuito telefonico di alta qualità porta le informazioni dall'Argonne al Maryland sotto forma di codice numerico per gli esperimenti di coincidenza.

Poiché un certo numero di segnali di coincidenza all'uscita dei due rivelatori può essere di natura casuale, è stato predisposto uno schema di classificazione delle coincidenze; secondo tale schema i gruppi di ampiezze di segnali ottenuti in ciascuna coincidenza vengono suddivisi in classi e, per ciascuna classe caratterizzata da un dato

Il registratore di coincidenze scatta (*frecce*) quando il segnale di uscita di uno o piú rivelatori attraversa una data soglia in un determinato intervallo di tempo. Il grafico in alto rappresenta i segnali del rivelatore cilindrico del Maryland in un periodo di circa mezz'ora; il grafico in basso indica i segnali del rivelatore cilindrico dell'Argonne nel corrispondente periodo. L'intervallo per accertare una coincidenza era stato fissato in 0,44 secondi. I due laboratori sono collegati da uno speciale circuito telefonico.

Nessuna significativa anisotropia (o dipendenza dalla direzione) viene messa in evidenza rappresentando graficamente l'intensità relativa delle coincidenze osservate in funzione del tempo solare (*istogramma a sinistra*). Questa scoperta indica che le coincidenze non possono essere correlate con nessun fenomeno associato al sistema solare. I numeri scritti sulle colonne indicano i numeri di coincidenze in ogni intervallo di tempo. Nell'istogramma a destra le seconde 12 ore sono sovrapposte alle prime 12 ore, a causa della possibilità di sfruttare la simmetria davanti-dietro dei rivelatori cilindrici.

Una grande anisotropia appare rappresentando l'intensità delle coincidenze in funzione del tempo sidereo. I massimi sia nella versione normale sia in quella sovrapposta coincidono nella direzione del centro della galassia. Quello in corrispondenza a 17 ore e 42 minuti è associato al passaggio meridiano del centro della galassia attraverso il piano perpendicolare all'asse del rivelatore. Quello in corrispondenza a 5 ore e 42 minuti rappresenta ancora il centro della galassia, visto attraverso la Terra dodici ore piú tardi.

intervallo di ampiezze, viene calcolato con le leggi probabilistiche il numero delle coincidenze casuali. Un significativo eccesso di conteggi in una particolare classe indica che le coincidenze non sono tutte accidentali.

La validità di questo procedimento può essere verificata notando che le coincidenze dovute a un effetto esterno dovrebbero scomparire inserendo un ritardo di tempo in un canale. Dovrebbero rimanere solo le coincidenze casuali. Quando fu eseguito un esperimento con un ritardo di tempo in parallelo con un esperimento senza ritardi, il rapporto degli eventi nei due gruppi di canali fu di cinque a uno, e ciò indica che, senza ritardi di tempo, i cinque sesti delle coincidenze di grande ampiezza sono dovuti a qualche fonte esterna che potrebbe essere o meno radiazione gravitazionale.

Per vagliare la possibilità che le coincidenze osservate possano essere dovute a effetti non gravitazionali che superano in qualche modo i filtri acustici e gli schermi elettromagnetici, sono stati eseguiti ulteriori esperimenti. Una serie di scosse sismiche artificiali nel laboratorio di Maryland non ha mostrato alcuna correlazione con le coincidenze. È risultato invece piú difficile scoprire eventuali eccitazioni elettromagnetiche.

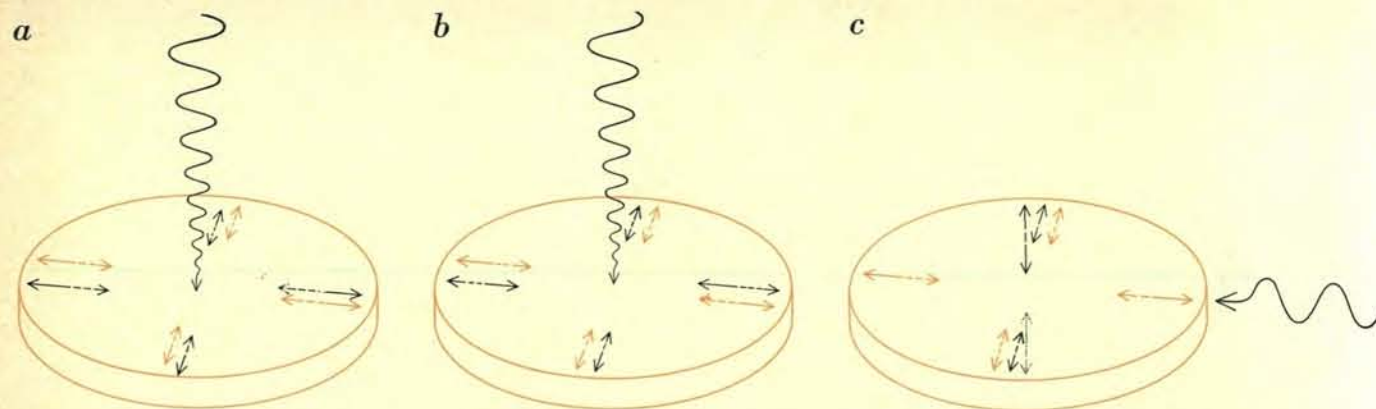
Le misure eseguite con ritardi di tempo hanno dimostrato tuttavia che le coincidenze osservate si originavano tutte nella parte meccanica del sistema.

È noto inoltre che si possono avere perturbazioni elettriche provocate da intensi sciami di raggi cosmici su piccole distanze, ma non su distanze di 1000 chilometri. Ciò nonostante i miei colleghi N. Sanders Wall, Gaurang Bhaskar Yodh e David H. Ezrow dotarono uno dei rivelatori di radiazione gravitazionale dapprima di contatori di radiazione Cerenkov e successivamente di scintillatori plastici da un metro quadrato, per poter vagliare la possibilità che i rivelatori venissero eccitati da particelle cosmiche di grande energia. L'effetto dei raggi cosmici non fu osservato nel rumore.

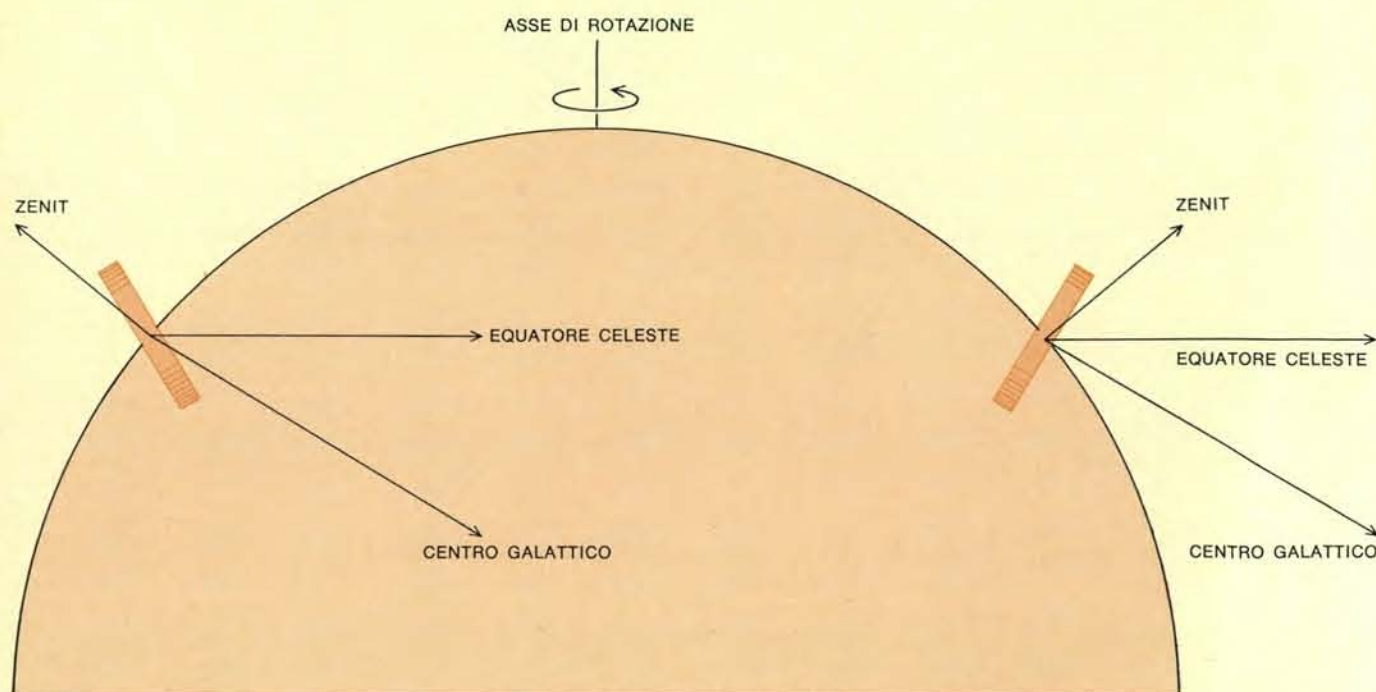
Per poter determinare la direzione della sorgente delle coincidenze osservate venne compiuto uno studio dei tempi nei quali esse si verificavano. Poiché le onde gravitazionali non dovrebbero essere apprezzabilmente assorbite dalla Terra, il diagramma direzionale della risposta di un cilindro con l'asse parallelo alla superficie terrestre e orientato secondo la direzione est-ovest dovrebbe presentare una simmetria di 12 ore. Per esempio, se la sorgente fosse il Sole, ci si dovrebbero aspettare dei massimi di intensità al mezzogiorno e alla mezzanotte locali. Un confronto dell'intensità delle coincidenze con i tempi solari non mostrò alcuna significativa anisotropia di tale tipo (*si veda l'illustrazione in alto nella pagina a fronte*). Questa osservazione dimostra una mancanza di correlazione delle coincidenze con qualsiasi fenomeno associato al sistema solare.

Un rivelatore a forma di disco è stato realizzato per decidere se la radiazione gravitazionale osservata è costituita da onde tensoriali, come previsto da Einstein, o da una combinazione di onde tensoriali e onde scalari, come proposto da altri fisici, in particolare da R. H. Dicke dell'Università di Princeton. Il disco misura circa due metri di diametro e quindici centimetri di spessore. È appeso all'interno di una camera a isolamento acustico ed elettromagnetico nel laboratorio del Maryland. Per esperimenti di coincidenza, esso è progettato per funzionare in collegamento con il rivelatore cilindrico del laboratorio Argonne.

A causa del moto di rivoluzione della Terra attorno al Sole, la Terra ruota sul suo asse una volta in piú ogni anno rispetto alle stelle e una data stella passa da un dato meridiano circa quattro minuti prima ogni giorno. Il tempo misurato riferendosi alla rotazione della Terra attorno alle stelle è chiamato tempo sidereo. Quando si rappresentano graficamente le coincidenze osservate in funzione del tempo sidereo, si rileva una forte anisotropia. Questo fatto è una chiara evidenza che la radiazione gravitazionale ricevuta nasce all'esterno del sistema solare (*si veda l'illustrazione in basso nella pagina a fronte*). I massimi di intensità sono nella direzione del centro della nostra galassia. Quello corrispondente a una ascensione retta di 17 ore e 42 minuti è associato al passaggio meridiano del centro galattico attraverso il piano perpendicolare all'asse del rivelatore. Il massimo a 5 ore e 42 minuti rappresenta ancora il centro galattico visto attraverso la Terra 12 ore dopo. (Le onde gravitazionali e i neutrini sono le sole forme di energia che possono attrasversare la Terra con attenuazione trascurabile, e l'analisi eseguita indica che il diagramma direzionale osservato non può essere messo in relazione con i neutrini).

I grafici di dodici ore, nei quali le seconde 12 ore sono « sovrapposte » alle prime, fanno uso della osservata simmetria davanti-dietro delle antenne cilindriche. Al crescere del numero di eventi in ogni intervallo, la migliore

Il disco è progettato per risuonare nel modo radiale a 1661 hertz, frequenza che si ritiene sia la piú adatta per le onde gravitazionali emesse da una stella in fase di collasso. Questo significa che in un dato istante tutti gli elementi di massa del disco dovrebbero muoversi radialmente verso l'esterno (*frecce colorate continue*), mentre, mezzo ciclo piú tardi, dovrebbero muoversi radialmente verso l'interno (*frecce colorate tratteggiate*). Cosí, un'onda gravitazionale scalare che colpisce il disco lungo il suo asse di simmetria circolare (*a*) dovrebbe eccitare una risposta risonante nel disco, poiché i suoi vettori forza coincidono (*frecce nere continue e tratteggiate*) con quelli del disco. Un'onda gravitazionale tensoriale che colpisce il disco in direzione assiale (*b*) non dovrebbe eccitare il disco, poiché i suoi vettori forza sono accoppiati con versi opposti e agiscono entrambi nel piano del disco. Un'onda tensoriale che incide radente al disco (*c*) dovrebbe invece eccitarlo, perché solo una coppia di vettori forza in verso opposto risulta nel piano del disco, mentre l'altra coppia è nella direzione dello spessore.

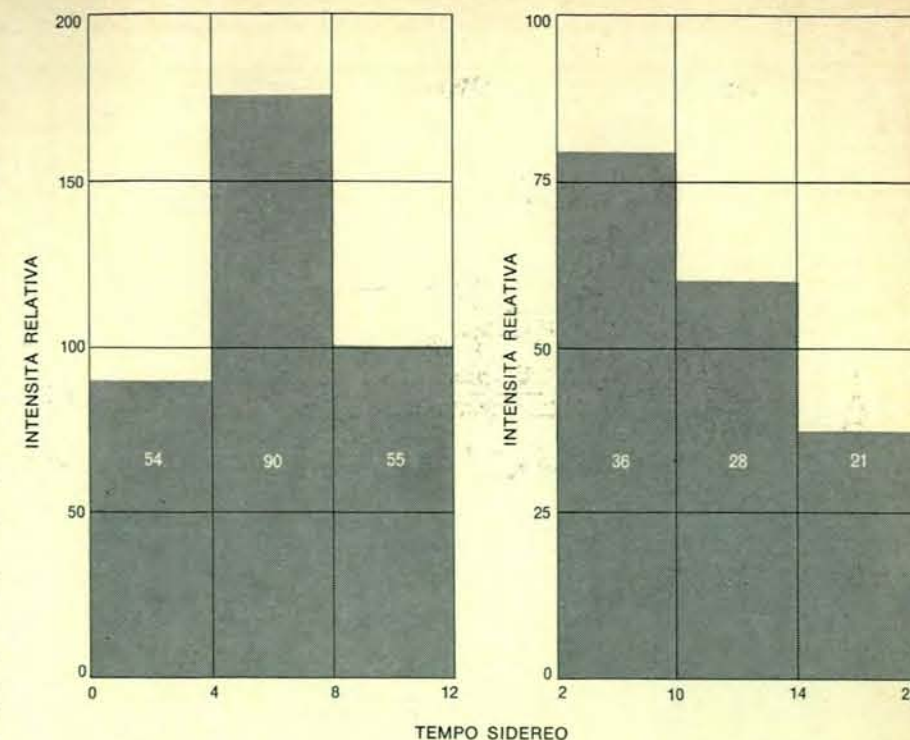
statistica consente un miglior confronto tra teoria ed esperimenti per il rapporto tra gli intervalli centrali e quelli estremi. La distribuzione degli eventi osservata era in ottimo accordo con la distribuzione teorica calcolata nell'ipotesi che il centro galattico fosse davvero la direzione della sorgente delle coincidenze.

La teoria della gravitazione di Einstein è una teoria tensoriale. Ciò significa che il campo gravitazionale in ogni punto dello spazio richiede, per una sua descrizione, 10 numeri, chiamati potenziali gravitazionali. Si può anche impostare una teoria scalare, con un solo numero per ogni punto dello spazio, il cui valore è indipendente dal sistema di riferimento dell'osservatore. La teoria tensoriale prevede onde a carattere quadrupolare (*si veda l'illustrazione in alto a pagina 26*). Un'onda scalare dovrebbe presentare una distribuzione di forze del tutto diversa, e le forze dovrebbero cambiare segno ogni mezzo ciclo (*si veda l'illustrazione in basso a pagina 26*). Molti fisici, in particolare Robert H. Dicke dell'Università di Princeton, hanno proposto delle modifiche alla teoria di Einstein, nelle quali è prevista una mescolanza di forze scalari e tensoriali. Si è resa quindi interessante una approfondita analisi del carattere della radiazione gravitazionale osservata. A tale scopo è stata realizzata una particolare antenna a

Il disco è disposto con il suo piano che guarda l'est e l'ovest, ma non verticalmente. Cosí il suo asse di simmetria è spostato rispetto alla direzione del centro della galassia quando quest'ultimo si trova sul meridiano locale (*a destra*). Dopo dodici ore, quando è ruotato di 180 gradi, il disco « vede » il centro della galassia quasi in direzione radente (*a sinistra*). Se la sorgente delle onde gravitazionali fosse in direzione esattamente opposta a quella del centro della galassia, si otterrebbero gli stessi risultati.

forma di disco (*si veda la figura a pagina 29*).

Se esistono onde gravitazionali scalari, il loro arrivo in direzione dell'asse di simmetria circolare del disco eccita i modi di oscillazione radiale del disco stesso; onde tensoriali dalla stessa direzione non eccitano il modo radiale perché una coppia di forze tensoriali elimina l'effetto dell'altra coppia. L'onda tensoriale può eccitare il disco solo se arriva in direzione radente al disco (*si veda lo schema in alto nella pagina a fronte*). In questo caso una coppia di forze eccita il modo radiale, mentre la coppia con verso opposto agisce nel senso dello spessore e non elimina il precedente effetto.

L'esperimento è stato predisposto col piano del disco nella direzione est-ovest, ma non verticale. Per tale orientazione l'asse di simmetria del disco era spostato all'indietro rispetto al centro della galassia, quando quest'ultimo passava sul meridiano. Tuttavia, la simmetria del disco è diversa da quella del cilindro. Quando la Terra ha fatto ruotare il disco di 10 gradi attorno all'asse polare, il disco « vede » il centro della galassia in direzione quasi radente (*si veda lo schema in basso nella pagina a fronte*). Il disco era posto in coincidenza con un cilindro all'Argonne, mentre i due cilindri erano contemporaneamente collegati in coincidenza.

Per i due cilindri venne ancora utilizzata la simmetria davanti-dietro, e le seconde 12 ore del tempo sidereo venivano sovrapposte alle prime. Si ottenne ancora l'anisotropia siderea con intensi massimi nella direzione del centro della galassia (*si vedano i grafici in questa pagina*). Poiché l'esperimento del disco non presenta la simmetria a 12 ore, l'istogramma è stato disegnato utilizzando la simmetria destra-sinistra del disco. Il settore del tempo sidereo dalle ore 14 alle ore 22 corrisponde all'orientazione dell'asse di simmetria del disco verso il centro della galassia. Il settore dalle ore 2 alle ore 10 corrisponde alla situazione in cui il disco riceve le onde radenti e per la quale ci si aspetta un massimo per il campo tensoriale. I rimanenti settori sono sovrapposti nell'intervallo centrale. L'intensità delle coincidenze disco-cilindro appare essere caratterizzata da un minimo nella direzione del centro della galassia, in corrispondenza a un'assenza di componente scalare, in accordo con la teoria di Einstein puramente tensoriale. Si deve tuttavia far notare che una componente scalare minore di qualche percento non avrebbe potuto essere rivelata.

I risultati dell'esperimento nel quale il disco del laboratorio del Maryland funzionava in coincidenza con un cilindro nel laboratorio delle Argonne, mentre i due cilindri nei due diversi luoghi erano in coincidenza, sono presentati in questi istogrammi. Per i due cilindri (*a sinistra*) le seconde 12 ore del tempo sidereo sono ancora sovrapposte alle prime. Come prima appare l'anisotropia siderea con grandi massimi nella direzione del centro della galassia. Poiché l'esperimento disco-cilindro (*a destra*) non ha una simmetria a 12 ore, nel tracciare queste colonne si è fatto ricorso alla simmetria destra-sinistra del disco. Il settore del tempo sidereo dalle ore 14 alle ore 22 corrisponde alla situazione in cui l'asse di simmetria del disco è orientato verso il centro della galassia; il settore dalle ore 2 alle ore 10 corrisponde invece alla situazione radente in cui è previsto un massimo per il campo tensoriale. I rimanenti settori sono combinati nell'intervallo centrale. Il « buco » nella direzione del centro della galassia che si osserva nell'intensità delle coincidenze disco-cilindro suggerisce l'assenza di una componente scalare, in accordo con la teoria puramente tensoriale della gravitazione di Einstein.

I fatti sperimentali sono ora inequivocabili. Se supponiamo che l'esperimento sia l'osservazione della radiazione gravitazionale proveniente dal centro della galassia e che l'analisi della sensibilità del rivelatore sia corretta, ogni evento corrisponde a una quantità di energia irraggiata dal centro della galassia pari a circa un quinto della massa del Sole, cioè una quantità equivalente alla conversione in energia di un quinto della massa solare. Tenendo conto della bassa efficienza di rivelazione, essa corrisponde a una energia di forse 1000 masse solari all'anno o piú. Tale quantità di energia è sorprendentemente enorme, piú di 10 000 volte quella delle onde luminose e delle onde radio emesse dalla direzione del centro della galassia. Dennis W. Sciama, Martin J. Rees e George B. Field hanno fatto notare che ciò che si conosce sulla dinamica della nostra galassia non è in disaccordo con una perdita di energia di forse 200 masse solari all'anno. Le loro argomentazioni sono basate sull'osservazione della recessione delle stelle, che si potrebbe spiegare sulla base di una perdita di energia di legame gravitazionale. Inoltre Sciama afferma che non esistono stelle in orbite legate i cui periodi superino il miliardo di anni, un fatto che è in accordo con una grande perdita di massa galattica.

Non è stata ancora determinata l'origine della radiazione gravitazionale osservata, ma solo la sua direzione di provenienza. È ragionevole pensare che la sorgente possa essere un oggetto insolito, come una stella pulsante di neutroni molto piú vicina del centro della galassia. È pure ragionevole pensare che la massa al centro della galassia agisca come una gigantesca lente, focalizzando la radiazione gravitazionale proveniente da un'epoca dell'universo piú remota. Poiché la radiazione gravitazionale non viene apprezzabilmente assorbita dalla materia, potrebbe darsi che essa si sia accumulata dall'inizio dei tempi. L'intensità relativamente grande apparentemente osservata con i nostri strumenti potrebbe probabilmente dirci a quando risale l'inizio dei tempi.

La turbina di Giovanni Branca (1629), il primo progetto rimastoci di turbina a vapore. Questo progetto, pubblicato nel volume *Le macchine*, anche se originale, è però totalmente privo di qualunque base di calcolo e non avrebbe mai potuto funzionare.

Le origini del motore a vapore

La prima intuizione della forza del vapore si incontra addirittura nel secondo secolo con Erone. Solo dopo 1500 anni fu possibile sfruttarla

di Alessandro Barghini

Fra il XVII e il XVIII secolo si pongono in Europa le basi per la cooperazione fra scienza e tecnica; piú di un millennio di esperienze nel campo della progettazione di macchine e di automatismi vengono messe a frutto per la produzione di beni, nasce la produzione di serie e con essa la rivoluzione industriale.

Se il perfezionamento dei nuovi automatismi esercita senza dubbio un ruolo importantissimo in questo sviluppo – basti pensare all'influenza sull'industria tessile della navetta automatica – è certo che l'elemento fondamentale, senza il quale non vi sarebbe stato l'incredibile sviluppo della produzione industriale, è la nascita di un nuovo motore primario, il motore a vapore. Questo, infatti, nello spazio di due secoli, liberando la disponibilità di energia meccanica dall'esistenza di corsi di acqua o di correnti costanti di vento, mette a disposizione una fonte di energia quasi inesauribile e indipendente dalla configurazione geografica, determinando un fortissimo impulso allo sviluppo industriale e uno sconvolgimento nella distribuzione degli insediamenti in Europa.

Il motore a vapore, dunque, costituisce la molla che dà vita alla rivoluzione industriale, rivoluzione che alcuni storici hanno anche voluto chiamare, in omaggio appunto all'importante ruolo in essa ricoperto dal vapore, seconda rivoluzione energetica, per distinguerla dalla prima, quella agricola del paleolitico, che mise a disposizione l'energia alimentare, base della nascita dei grandi imperi.

Lo strano del fenomeno è però che il motore a vapore, nella sua doppia concezione, a stantuffo e a turbina, aveva un'ideazione antica, risaliva, probabilmente, ad almeno 1500 anni prima, e solo nel XVII secolo riuscí a trovare la sua realizzazione completa.

Quali sono le cause di questo grande ritardo fra la scoperta della forza del vapore e la sua applicazione su vasta scala? La maniera migliore per rispondere a questo interrogativo è quella di analizzare l'intero arco di sviluppo fra la concezione iniziale e la realizzazione, e vederne le fasi critiche di passaggio da una fase e l'altra.

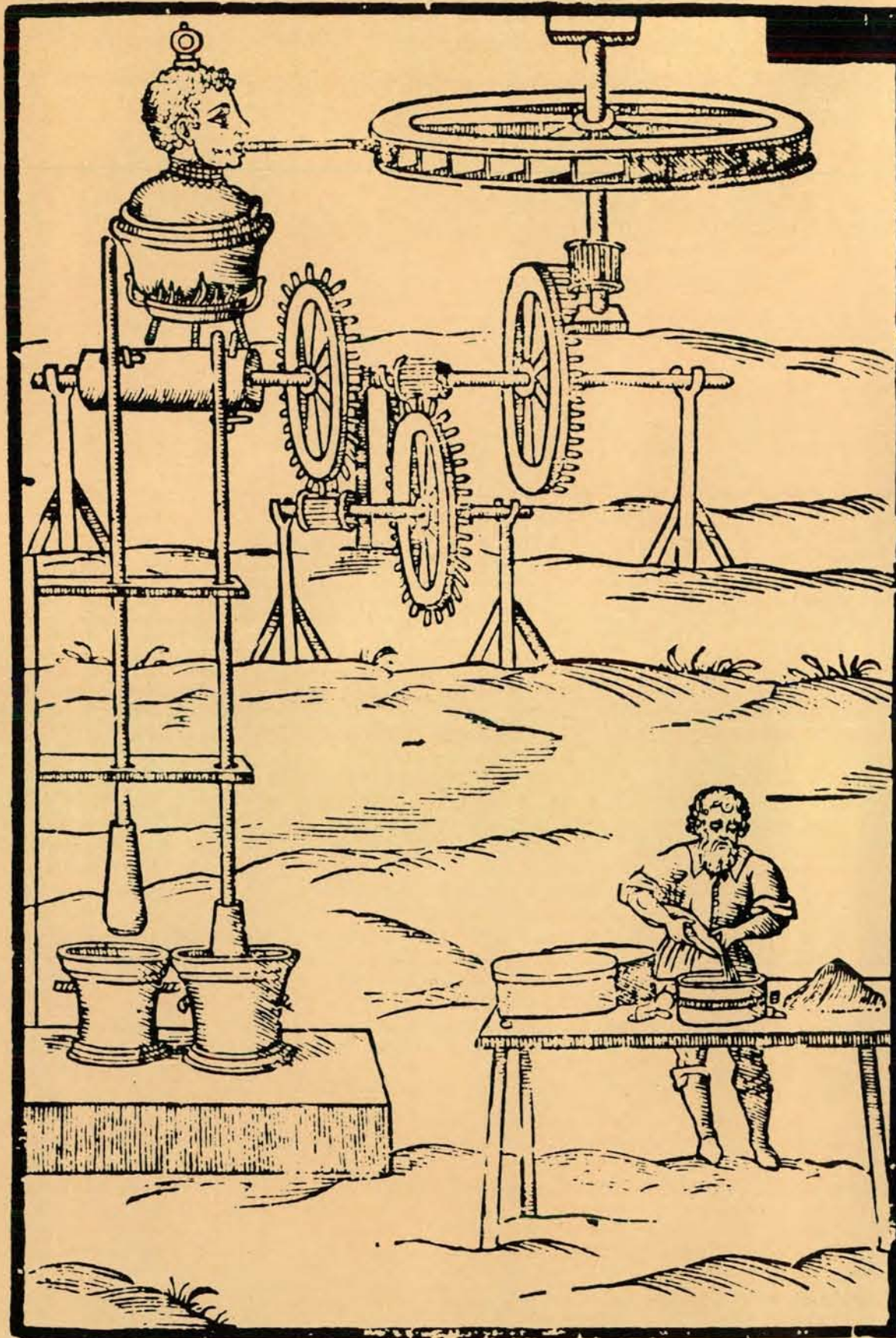
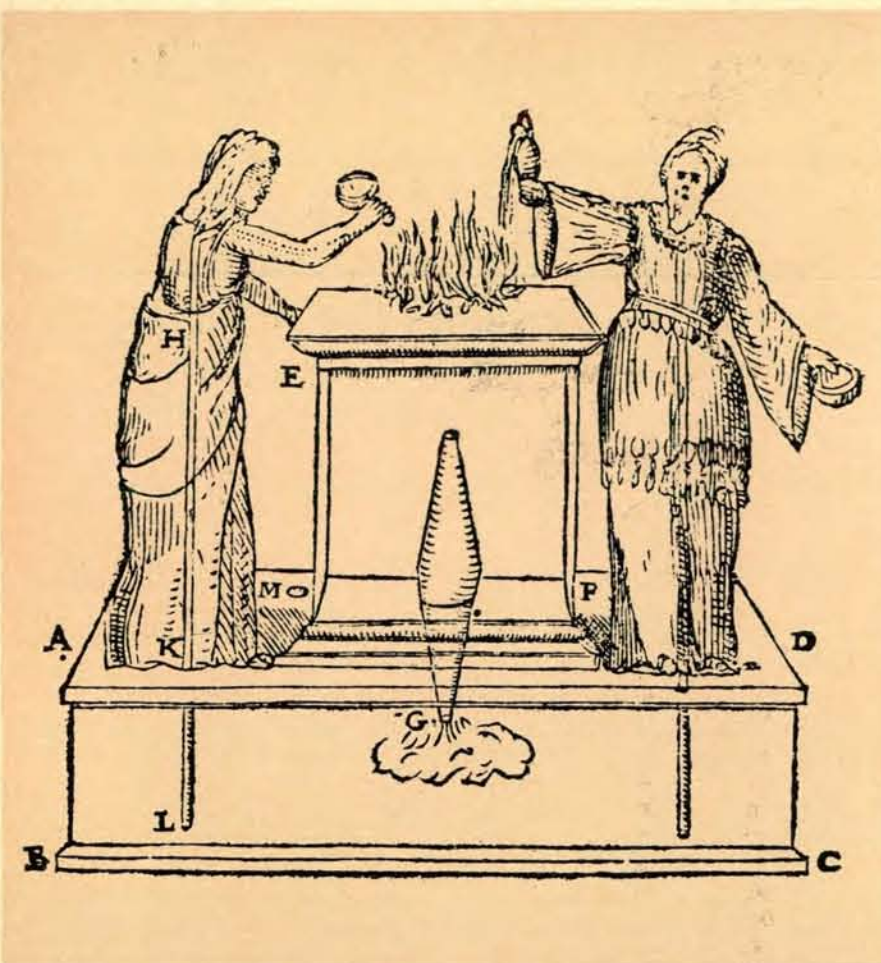
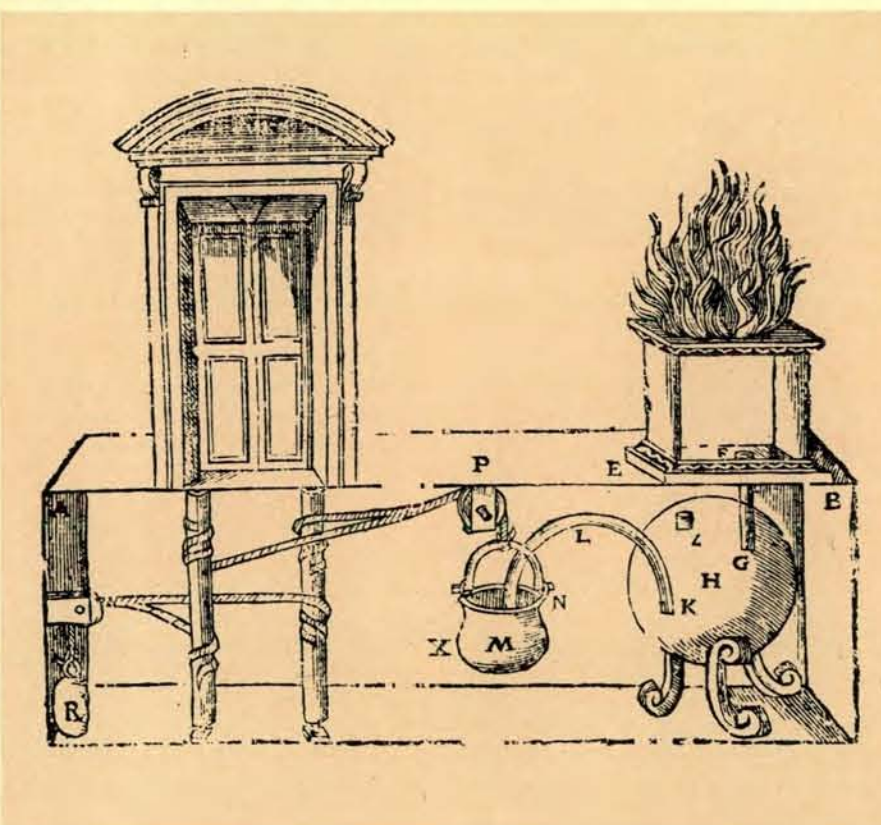
La prima intuizione della forza del vapore si incontra in un testo di un meccanico alessandrino del II secolo dopo Cristo: *Le pneumatiche* di Erone. Forse, però, altri esperimenti erano stati compiuti nel passato, nell'ambito di quella stessa scuola di meccanici alla quale appartenne Erone (e che raccolse tecnici della portata di Ctesibio, di Filone da Bisanzio e di Pappo) ma, se pure venne fatto qualche esperimento, non ce ne rimane traccia. Le macchine ideate, infatti, sono semplici e quasi elementari, nel meccanismo dello sfruttamento del vapore, mentre gli organi accessori appaiono sufficientemente complessi da far pensare che Erone non volesse mettere l'accento sul primo quale novità, ma di mostrarne possibili applicazioni.

Le utilizzazioni della forza del vapore proposte da Erone sono molteplici, e vanno da un « teatro automatico » nel quale, all'accensione del fuoco, alcune marionette si muovono, fino a un sistema per sollevare l'acqua sfruttando la forza del vapore (*si veda la figura in alto a pagina 34*).

Nella varietà delle macchine proposte, ciascuna concepita a scopo sacrificale o di puro divertimento senza accenni di applicazione pratica, restano costanti due principi, quello della dilatazione del vapore e della sua condensazione in un sistema chiuso, assimilabile a uno stantuffo, e quello dello sfruttamento del principio di reazione, una caldaia nella quale un piccolo foro lascia sfuggire il vapore, base della turbina. Vediamo in dettaglio due meccanismi tipici.

Il piú complesso, e anche quello che ha avuto una maggiore risonanza, citato da storici antichi e moderni, è un tempietto le cui porte si aprono quando si accende il fuoco e si chiudono quando il fuoco si spegne (*si veda la figura in basso a pagina 34*).

Lo sfruttamento del vapore, contrariamente al meccanismo, è semplice. Il fuoco acceso sull'ara provoca il riscaldamento e la dilatazione del mezzo, aria o vapore, il quale preme sulla superficie d'acqua facendo riversare il liquido, mediante sifone, in un recipiente. Questo, legato a una corda avvolta intorno a due assi che azionano l'apertura delle porte, è libero di scendere e salire in verticale. Il secchiello, aumentando di peso per l'afflusso di acqua, discende e determina l'apertura delle porte. Quando il fuoco si spegne l'aria si raffredda, il vapore si condensa, diminuisce la pressione sulla superficie del liquido, l'acqua nel secchiello viene risucchiata, questo perde peso e tende a risalire sotto l'azione di un contrappeso fissato alle assi, per cui le porte si richiudono. Nella sua semplicità il sistema è un vero e proprio motore a vapore a doppio effetto. Sarebbe bastato che Erone avesse applicato il principio della dilatazione e della contrazione del vapore alla sua pompa premente, progettata per spegnere gli incendi, e sarebbe nato il motore a vapore. È interessante però notare che, con il sistema da lui elaborato, Erone riuscí a evitare un problema che sarebbe stato quasi irrisolvibile per la tecnologia del tempo, quello della costruzione di un pistone a doppio effetto a tenuta perfetta.

Anche piú elementare, e piú gravido di conseguenze, è il meccanismo della semplice caldaia. Questa, in una versione, consiste di una semplice caldaia di

Uno dei tanti meccanismi progettati da Erone nel quale la forza del vapore fa muovere degli automi (*sopra*). Questi progetti continueranno a essere prodotti in vario modo durante tutto il Medioevo. Ecco invece il dispositivo per aprire e chiudere le porte di un tempio mediante il calore secondo una ricostruzione del XVI secolo (*sotto*).

bronzo (o addirittura di terracotta) riempita d'acqua posta su un fuoco, e dalla quale il vapore può uscire solo da un piccolo foro. Il vapore, fuoriuscendo rapidamente, può imprimere alla caldaia un moto, se questa è libera di muoversi, o creare una forte corrente d'aria. Sarebbe bastato che la caldaia venisse applicata all'odometro, descritto dallo stesso Erone, perché ci trovassimo di fronte alla prima, sia pure embrionale, turbina. Qui, tuttavia, piú che negli altri esperimenti, si scorge la tenue base, quasi magica, alla quale è ricollegato il meccanismo. Il fenomeno, infatti, anche se spiegato, resta circondato da un'atmosfera quasi divina, il nome stesso, « eolipila », è ricordo del dio dei venti, ed è significativo che anche quando gli ingegneri del XVII secolo ripresero il principio concependo la prima turbina, mantennero alla caldaia il nome di eolipila, conferendole anche tratti antropomorfici, quelli di una testa dalle cui labbra (ugello della caldaia) fuoriesce il vapore.

Ciò che piú sorprende di questi meccanismi non è tanto la loro complessità, giacché altri ben piú complessi Erone ne presenta, quanto la loro formulazione scientifica che, sia pure sotto forma dell'aristotelismo, appare esatta. La fisica di Aristotele, che avrebbe dominato piú di un millennio fino a divenire una pura formula, trita e priva di senso, appare infatti in Erone ancora viva e dinamica, capace di spiegare la realtà. Dati i quattro elementi, ciascuno tendente al proprio luogo naturale, la terra, l'acqua, l'aria e il fuoco, la commistione di due determina uno spostamento dell'equilibrio. L'acqua, portata a contatto del fuoco, prende parte della forza di quest'ultimo, e tende verso l'alto, luogo naturale del fuoco, cercando di superare ogni ostacolo. Con questa teoria Erone spiega non solo i fenomeni meteorologici, ma anche quegli « artificiali e spirituali » movimenti dei quali abbiamo appena parlato.

Già nel II secolo dopo Cristo, quindi, la forza del vapore era stata scoperta, e ne erano state ideate le prime utilizzazioni. Perché, dunque, queste non ebbero sviluppi e il motore a vapore attenderà piú di 1500 anni prima di comparire nella sua forma definitiva? È questa una domanda che spesso si sono posti gli storici della scienza, e che ricade nel piú vasto interrogativo del perché l'antichità non abbia conosciuto un macchinismo. La risposta non è semplice, e va ricercata non solo nella disponibilità di strumenti tecnici, ma anche nella mentalità complessiva del mondo greco-romano.

Molti storici hanno voluto vedere il mancato inizio del macchinismo, e in genere la mancata applicazione della scienza e della tecnica alla vita produttiva, alla divisione netta, presente nella società antica, fra lavoro manuale e lavoro intellettuale. Un mondo estremamente raffinato, capace di progettare complessi meccanismi, o di effettuare sottilissimi calcoli come quelli per la progettazione di templi o per lo studio dell'astronomia, era poi incapace di concepire applicazioni pratiche delle scoperte raggiunte. Anche quando la mente dell'intellettuale riusciva a concepire nuove scoperte, mancava l'elemento di unione fra intellettuale e meccanico che mettesse in pratica i principi astrattamente concepiti. L'uomo antico, compreso della nobiltà del pensiero, non riusciva a compiere il passo che rendeva possibile adattare le sue scoperte alle arti pratiche.

L'ipotesi è attraente, e spiega molto della mancata applicazione della scienza alla tecnica antica, ma forse è troppo esclusiva. I documenti rimastici dall'antichità mostrano infatti che, quando era possibile, molte applicazioni concepite teoricamente furono messe in pratica. L'idea, per esempio, che gli antichi non riuscirono a compiere il passo logico che li avrebbe portati ad applicare agli acquedotti il principio dei vasi comunicanti, compiendo sforzi immensi per la realizzazione di giganteschi complessi murari che dalla sorgente portavano in lieve pendenza l'acqua fino al punto di uso, trova smentita negli acquedotti in galleria scavati nella roccia, come quello di Pergamo, che sfruttavano appunto tale principio e che tuttora testimoniano la capacità costruttiva dell'antica Grecia e della Roma imperiale. In effetti, in base alle conoscenze oggi disponibili sull'antichità, possiamo dire che i grandi acquedotti a piano inclinato furono realizzati in quanto non si disponeva di materiali idonei per realizzare tubature a pressione, e l'espediente di ricorrere a un piano inclinato a cielo aperto rappresentò una maniera per risolvere la scarsità di metalli e l'arretratezza della metallurgia, che non avrebbero permesso di realizzare tubature adeguatamente resistenti.

Sempre nel settore della distribuzione dell'acqua altri meccanismi complessi, mostrano come in realtà fra tecnica materiale e tecnica speculativa vi fosse un continuo scambio. A Pompei, per esempio, sono stati ritrovati sistemi di distribuzione automatici dell'acqua azionati da monete: veri e propri contatori dei quali un secolo piú tardi parlerà Erone di Alessandria.

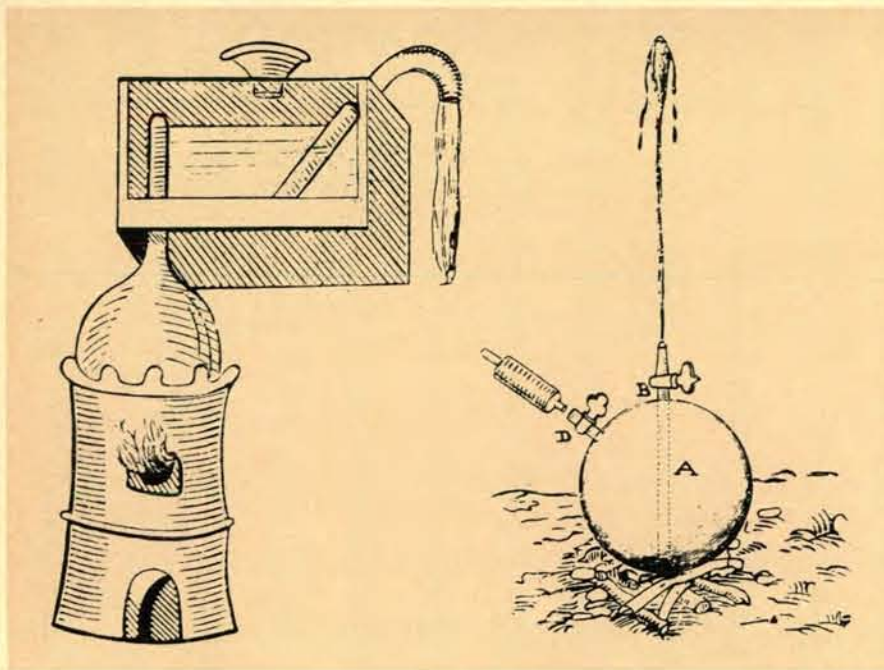
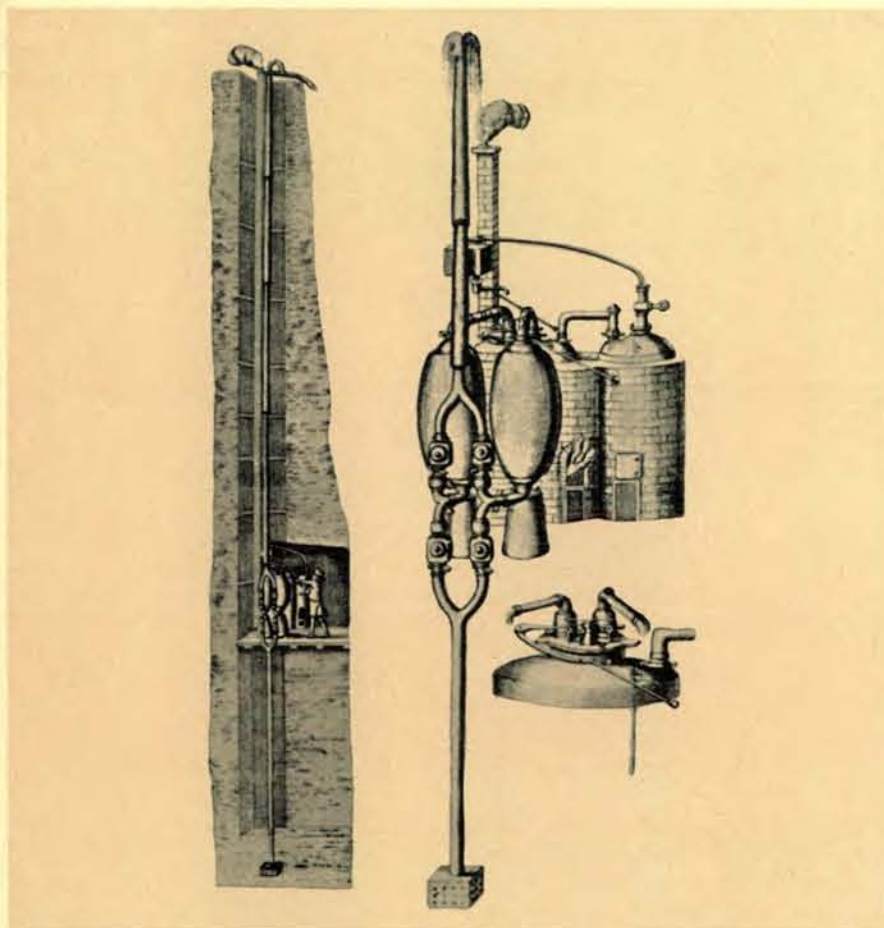
Uno degli schizzi di Leonardo contenente progetti per l'utilizzazione del vapore. Alcuni storici vogliono considerare Leonardo l'inventore della turbina a vapore e del motore a scoppio a polvere da sparo, ma è impossibile affermarlo con certezza.

Forse, dunque, l'ipotesi di una completa separazione fra lavoro manuale e lavoro intellettuale deve, sia pure in parte, essere rivista. D'altronde esisteva un ostacolo ben piú netto e concreto alla realizzazione di nuove macchine: l'arretratezza della metallurgia e la scarsità di metalli; forse (come per gli acquedotti e il principio dei vasi comunicanti) questo fu, per lo sviluppo di un motore primario a vapore, uno dei principali ostacoli. Non bisogna infatti dimenticare che, quando quindici secoli piú tardi i nuovi tecnici si accinsero a realizzare concretamente i primi motori a vapore, il problema era ancora presente: da Papin a Newcomen la difficoltà di realizzare cilindri e pistoni a tenuta costituí uno degli ostacoli principali nella progettazione.

D'altra parte il problema della ricerca di un motore primario doveva prendere, nella fasi di passaggio fra la fine dell'impero romano e l'inizio del Medioevo, ben altra strada. Il grande impero vacillava infatti sotto la pressione di una carenza endemica di fonti di energia. Il lavoro umano, principalmente servile, dava scarso rendimento, e ancora minore era quello di origine animale, mentre perfino le forze dei venti venivano sfruttate solo molto parzialmente nella navigazione. I trasporti creavano problemi quasi insormontabili, soprattutto per l'approvvigionamento dei grandi centri urbani, mentre le attività produttive, anche le piú semplici, dall'aratura dei campi alla macinazione del grano, richiedevano un lavoro animale o umano spropositati.

La crisi dell'impero, e soprattutto delle grandi città, fu in grande misura determinata proprio dalla carenza endemica di fonti di energia, che sostituissero il lavoro animale e umano; carenza aggravata anche dai conflitti derivanti dalle reazioni della popolazione alla meccanizzazione delle attività produttive. Proprio nel periodo del disfacimento dell'impero ci troviamo di fronte alla crescente utilizzazione di un nuovo motore primario, il mulino ad acqua, presente già da alcuni secoli (anche se allo stato embrionale) che si fa strada fra torbidi sociali e resistenze alla sua introduzione. Il nuovo motore scaccia qualunque utopia di progettazione di motori a vapore, e domina per piú di quindici secoli la produzione di energia meccanica di origine inanimata.

Il vapore non cadde dunque nel dimenticatoio per uno scarso interesse nei confronti delle fonti di energia ma, anzi, proprio per il motivo opposto, in quanto la sua progettazione avrebbe richiesto uno sforzo eccessivo, e avrebbe potuto dare risultati solo a lungo termine, mentre un altro motore primario era già disponibile, pronto a far fronte alla richiesta di energia di una società in evoluzione.

Tutto il Medioevo appare inoltre gravido di scoperte nel campo dell'energia animata e inanimata. Sono pochi i settori che, nell'arco del millennio che va dalla caduta dell'impero romano di occidente al primo Rinascimento, non

Congegno per il sollevamento delle acque mediante il calore (*a sinistra*). Giovanbattista della Porta, autore di questo progetto, spiegò non solo che l'acqua poteva essere spinta verso l'alto sfruttando il potere espansivo del vapore, ma anche che poteva essere risucchiata dal basso verso l'alto sfruttando la condensazione del vapore dentro il recipiente. A destra, un congegno di de Caus per ottenere zampilli di acqua mediante il calore che è molto simile a quello di della Porta. Il de Caus, ingegnere idraulico, progettò complessi meccanismi per l'alimentazione di fontane ornamentali.

« L'amico del minatore, o macchina per sollevare acqua con il fuoco » di Savery (1699). Si tratta della prima macchina a vapore che trovò una utilizzazione pratica.

mostrano progressi sensibili nel campo dell'utilizzazione di fonti di energia. L'evo dell'oscurità appare, a piú accurata ricerca, anche sotto quest'aspetto, un'epoca diremmo quasi di lumi. Dalla navigazione, che mediante nuove vele e il timone incernierato a poppa, permette la conquista dei mari, ai nuovi sistemi di bardatura degli animali da tiro e da sella, che raddoppiano la capacità di trasporto degli animali, ai mulini ad acqua e a vento si compiono passi immensi. Tanto immensi che alcuni storici, accanto alla rivoluzione del paleolitico, che con l'agricoltura forní l'energia alimentare necessaria alla nascita dei grandi imperi, e la rivoluzione industriale, che con il motore a vapore forní una fonte immensa di energia inanimata, vorrebbero porre una terza rivoluzione energetica, quella del Medioevo, che portò l'uomo a dominare le forze della natura.

Che ne è, durante questo millennio cosí impegnato nell'utilizzazione delle forze della natura, del vapore?

I documenti al riguardo sono scarsi e controversi, potrebbe quasi sembrare che la forza del vapore scompaia dalla speculazione tecnologica. Incontriamo un organo, forse a vapore, a Bisanzio, e qua e là citazioni di esperimenti che forse potrebbero essere ricollegati al vapore. Ma l'assenza di documenti, o la loro scarsità, non ci autorizza a negare il fenomeno. Su troppi argomenti il mondo medioevale ci lascia privi di documentazione scritta, mentre poi la ricerca archeologica ci fornisce testimonianze incontrovertibili. D'altra parte, riguardo al vapore, basta pensare al grande sviluppo dell'alchimia per comprendere che le speculazioni e gli esperimenti sugli effetti del riscaldamento dei liquidi non dovevano essere trascurati. Cosa è, infatti, un alambicco se non una eolipila?

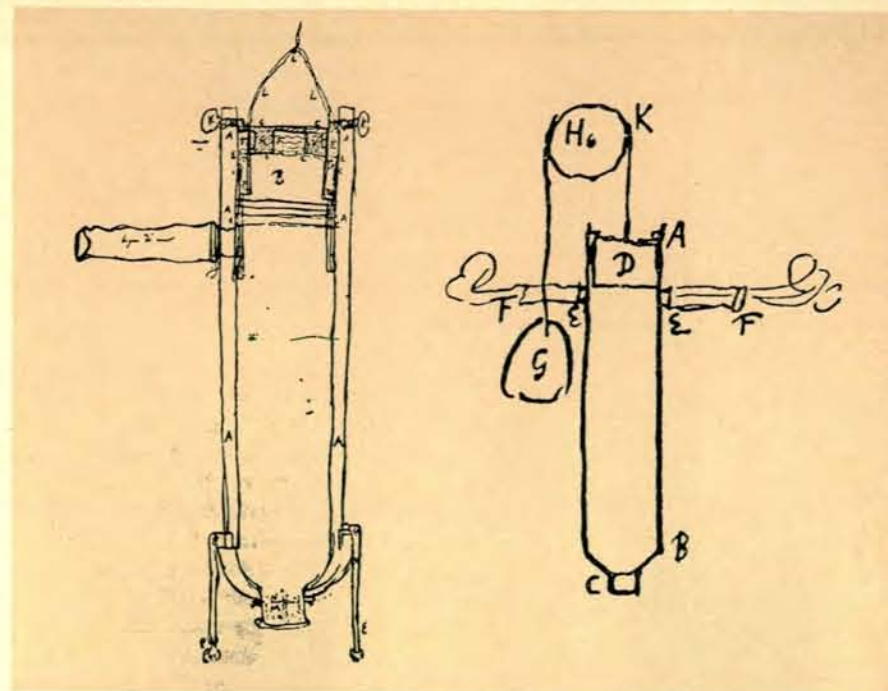
E in effetti è proprio l'eolipila che, fra le « spirituali » macchine di Erone, ricompare per prima nel Medioevo. Il grande filosofo, Alberto Magno scrive infatti nel XIII secolo: « Prendi un recipiente resistente di terracotta con due buchi, riempilo di acqua, chiudine fortemente i fori e ponilo vicino al fuoco. Subito il vapore sturerà i due fori tappati e spargerà acqua calda all'esterno. Per questo motivo questo recipiente viene chiamato *sufflator* (soffiatore), e in genere è fatto a forma di uomo ».

L'eolipila di Erone è dunque rinata, o forse non è mai morta, e trova ben presto una utilizzazione pratica: gli ingegneri militari se ne servono come mantice per attizzare i fuochi di legna fresca, e poco dopo alcuni dei piú grandi architetti, da Filarete a Leonardo (*si veda la figura a pag. 35*), ne progettano tipi diversi.

I tempi erano ormai maturi. La ventata di umanesimo che riporta alla lettura e alla stampa degli antichi ripropone opere classiche di meccanica e di architettura. I curatori di tali classici (da Euclide ad Archimede, da Erone a Pappo) sono uomini come Tartaglia e Dati, studiosi e ricercatori di profonde intuizioni, che pongono le basi della scienza e della meccanica moderna. Parallelamente ingegneri della levatura di Ramelli e di Zonca affrontano a fondo il problema del macchinismo, ideando nuove macchine o perfezionando quelle esistenti. Nelle loro opere lo sforzo di inventiva è sostenuto dall'esperienza pratica e da una profonda sensibilità per i problemi posti da una società in rapida evoluzione, che richiede nuove concezioni nella tecnica materiale, da quella bellica a quella mineraria. È in questo contesto che fanno la prima comparsa i motori a vapore di concezione moderna.

D'altronde la necessità di una nuova fonte di energia indipendente dai salti di acqua e dalla presenza continuativa del vento si faceva sempre piú impellente. I giganteschi sistemi minerari richiedevano pompe capaci di prosciugare le infiltrazioni di acqua, mentre le manifatture in continuo sviluppo sentivano la necessità di una fonte di energia indipendentemente dalle condizioni meteorologiche. Ormai non erano piú solo le mole, i frantoi, le macchine per la follatura della lana o le seghe che richiedevano energia inanimata, ma anche i mantici degli altiforni, i magli dei fabbri, e perfino le macchine per coniare monete e le mole per la lavorazione delle pietre preziose.

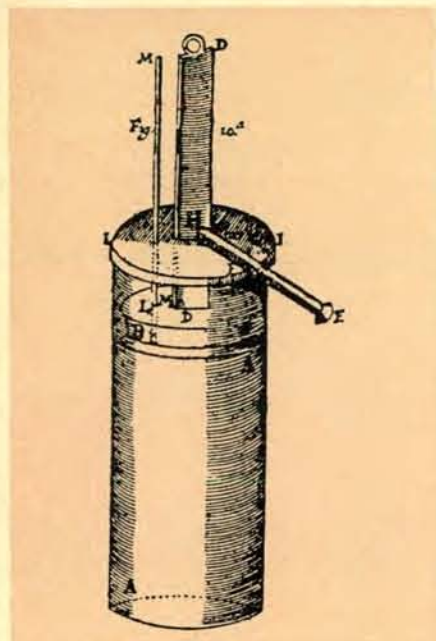
Scienziati e ingegneri del XVI e del XVII secolo si impegnano a fondo nella ricerca di questa nuova fonte di energia. Appaiono i primi progetti, sia pure embrionali, di motori che sfruttano il vapore, e perfino di motori a scoppio. Leonardo progetta un cannone che sfrutta la forza espansiva dell'esplosione per spingere uno stantuffo, e per compiere un lavoro. Progetto ripreso, come vedremo, piú di un secolo dopo da Huygens, ma che sarebbe stato realizzato solo piú di tre secoli piú tardi, con una tecnologia dei metalli ben piú raffinata e con la scoperta dei nuovi combustibili liquidi.

Frattanto l'opera di traduzione dei classici ripropone i vecchi progetti di Erone. Ci troviamo cosí di fronte a tutta una serie di esperimenti compiuti da matematici della portata di Cardano (l'inventore dello snodo che porta il

Due macchine a polvere da sparo di Huygens. Le due macchine, progettate a tavolino, sfruttavano la polvere da sparo solo come mezzo per rarefare l'aria; lo sfruttamento del moto iniziava infatti dopo che l'esplosione aveva portato a fine corsa il pistone, e la pressione atmosferica tendeva a riportarlo nella posizione originaria.

suo nome) e di Giovanbattista della Porta (uno dei fondatori dell'ottica moderna) che mostrano concretamente il profondo interesse suscitato dalle nuove possibilità di applicazione del vapore e, in genere, dello sfruttamento del potere espansivo dell'acqua e dell'aria. Ma ora gli esperimenti sono seguiti da accurati calcoli e misurazioni, si comincia a profilare, sotto le nuove ricerche della statica e della meccanica, il concetto di energia.

Fra questi esperimenti forse il piú interessante è quello effettuato da della Porta (*si veda la figura in alto a fronte*). Si tratta di un progetto non nuovo, ma che costituisce un importante ripensamento dell'opera di Erone. La macchina è elementare, composta di una caldaia che immette il vapore in un recipiente chiuso ermeticamente, con un solo foro, dentro il quale è contenuta dell'acqua. La forza del vapore, afferma della Porta, è sufficiente a spingere l'acqua contenuta nel recipiente a grande altezza (sullo stesso principio si basa un cinquantennio piú tardi Salomon de Caus per la progettazione di una pompa, come mostra la medesima figura) ma, aggiunge della Porta, una volta che l'acqua sia uscita, e il vapore comincia a condensarsi, il recipiente è capace anche di risucchiare l'acqua dal basso.

L'esperimento, in un certo senso, non è altro che il meccanismo di apertura delle porte del tempietto di Erone, ma quali passi si sono compiuti! In della Porta si percepisce la necessità di misurare, di calcolare e di applicare concretamente il meccanismo per compiere un lavoro. Questo principiò, d'altronde, costituirà la base del primo sfruttamento pratico del vapore nella macchina « l'amico del minatore » progettata e realizzata un secolo dopo da Savery, in Inghilterra (*si veda la figura in basso a fronte*).

Come la macchina di della Porta, infatti, quella di Savery è ricalcata sul principio di Erone. Si compone di un generatore di vapore separato, connesso a un contenitore. Nella fase iniziale questo è riempito d'acqua, e il vapore spinge l'acqua verso l'alto, fuori della miniera, finché il contenitore non sia vuoto. A questo punto il ciclo si inverte, mediante la chiusura manuale dei condotti di adduzione del vapore e delle valvole superiori, e l'apertura di quelle inferiori; il raffreddamento del vapore determina una diminuzione della pressione, l'acqua dal fondo della miniera viene aspirata fino a riempire il contenitore, e la macchina è pronta per iniziare nuovamente il ciclo. La presenza di due contenitori che vengono fatti funzionare alternativamente, assicura una certa continuità al ciclo. Nella sua elementarità, la macchina di Savery fu il primo meccanismo che sfruttasse concretamente la forza del vapore, e fosse in grado di funzionare facilmente, al punto da poter essere

La prima macchina a vapore di Papin, che ricalca da vicino il progetto di Huygens illustrato nella figura precedente.

installata subito in parecchie miniere. La macchina appare inoltre importante anche per un altro motivo, perché, nella sua semplicità, mette ancora una volta in rilievo l'arretratezza della metallurgia. In sostanza essa si presenta infatti come un vero e proprio motore a cilindro a doppio effetto ma, mentre il motore a cilindro vero e proprio avrebbe avuto la necessità di cilindri e pistoni perfettamente calibrati, con tolleranze minime, e resistenti a pressioni relativamente alte, l'espediente adottato da della Porta e in seguito da Savery (come nel meccanismo di Erone), trasformava la superficie dell'acqua stessa in un vero e proprio pistone a perfetta tenuta, che si poteva adattare a superfici anche non rifinite.

Mentre, fra i matematici, la piú chiara espressione degli sviluppi ci è offerta da della Porta, nel campo dei meccanici la rappresentazione piú significativa del processo di ripensamento intorno al motore a vapore ci è offerto da Giovanni Branca, che nel 1629, nel suo libro intitolato *Le macchine*, illustra la prima turbina a vapore della storia della tecnica.

Come si vede dalla riproduzione a pagina 32, la concezione della macchina è anch'essa strettamente ricalcata dagli scritti di Erone. La caldaia del motore è una vera e propria eolipila – che conserva perfino caratteri antropomorfici – posta sul fuoco, che soffia dalle labbra su una ruota, un odometro o una ruota ad acqua. Branca era riuscito quindi a compiere quel semplice passo logico che Erone non era stato in grado di fare. L'unica innovazione è il meccanismo da essa azionato, un « pistrino » per macinare sassi. Segno questo del distacco da Erone: il vapore non è piú concepito come pura

La seconda macchina a vapore di Papin (1709) nella quale si vede lo sforzo di progettazione e di razionalizzazione del sistema. Con questa macchina, e con quella di Savery, il motore a vapore si avvia verso la concezione moderna, e diviene una nuova fonte di energia inanimata pronta a far fronte alle esigenze della società industriale.

forza quasi magica, da usare per scopi sacrificali, ma come ausilio al lavoro dell'uomo.

La rappresentazione è interessante, ma ingenua. Nessun calcolo viene fatto della forza del rendimento della macchina, e anche a prima vista viene da pensare che una turbina cosí concepita difficilmente avrebbe potuto dare una resa apprezzabile. Furono compiuti esperimenti in questo campo? È difficile dirlo. Era comune, infatti, fra i meccanici del XVI e del XVII secolo progettare macchine assolutamente irrealizzabili, nelle quali le resistenze interne avrebbero reso impossibile il benché minimo movimento. Si pensi, al riguardo, che fra questi meccanici era ancora in voga lo studio del moto perpetuo, e uno dei migliori testi di macchine che ci rimanga dal XVII secolo, *Il novo teatro di machine et edifici* di Vittorio Zonca, termina appunto con una tavola di una macchina « per cavar acqua con moto perpetuo ».

Difficilmente, dicevamo, una turbina a vapore avrebbe potuto funzionare in un sistema cosí aperto. Branca non aveva compiuto alcuno sforzo di progettazione; infatti, sarebbe forse bastato che avesse applicato il principio dell'elica, scoperto da tempo da Leonardo, e applicato per scopi consimili (per sfruttare le correnti ascendenti create in un caminetto per muovere uno spiedo) da Zonca, per giungere a un sistema chiuso, forse suscettibile di compiere un lavoro. Il passo, tuttavia, non fu compiuto, e per piú di due secoli lo sviluppo del motore a vapore avverrà lungo la linea dello stantuffo. Solo quando la metallurgia permetterà di realizzare turbine ben piú consistenti, e l'ingegneria di calcolarle, la turbina riprenderà il sopravvento.

La turbina di Branca essendo dunque pura intuizione, senza alcun calcolo per misurarne la realizzabilità, il sistema che continua a dominare le ricerche sul motore primario è quello dello stantuffo, secondo le direttive additate da matematici e scienziati, con l'ausilio dei nuovi studi scientifici, e su basi di stretto calcolo.

Nel giro di un secolo studi frammentari, in settori diversi, offrono le basi del calcolo della forza del vapore. Gli studi di Galileo sulla statica e sulla meccanica, le esperienze di Torricelli sulla pressione atmosferica, l'esperimento di Guericke con gli emisferi di Magdeburgo e le ricerche in tutta Europa volte alla fondazione e al perfezionamento della scienza sperimentale contribuiscono, come pezzi di un mosaico, a porre le basi del nuovo motore primario. L'idea base era nata, ma avrebbe bisogno di elementi solidi. Era necessario non solo aver intuito l'esistenza della forza del vapore, ma conoscerne anche l'entità, misurarla.

I meccanici come Branca, è vero, sembrano dare nuove intuizioni, pubblicano opere che, in centinaia di tavole, presentano meccanismi semplici e complessi, sistemi di trasmissione del moto, di migliore sfruttamento delle forze disponibili: l'acqua e il vento. Ma sono esperienze frammentarie, non sorrette dal calcolo. In una stessa tavola, per esempio, incontriamo tre ruote ad acqua, tutte e tre nelle stesse condizioni rispetto al salto, l'una colpita per di sotto, l'altra per di sopra e la terza di fianco, senza che l'autore cerchi di spiegare quale offre la maggiore resa. L'idea del calcolo è ancora lontana dalle menti dei meccanici sperimentali. Queste opere, tuttavia, resteranno testi fondamentali per gli artigiani dei secoli successivi, prima dell'avvento definitivo del motore a vapore, ma piú come monumenti di una elaborazione durata oltre un millennio, che come testi della nuova tecnologia.

La costruzione di un nuovo motore primario richiede ben altre menti, ed è a matematici acuti e a filosofi come Huygens, Papin e Leibniz, o a uomini pratici con notevoli concezioni teoriche, come Savery e Watt, che è dovuta la progettazione del motore.

Huygens, con la sua mentalità di filosofo e di scienziato, fu il primo a raccogliere la messe di dati forniti dallo sviluppo delle scienze per la progettazione di un motore primario. La progettazione parte da una solida preparazione scientifica, e dall'abitudine a un ragionamento serrato. Fin dal 1666 il filosofo aveva proposto a Colbert di invogliare l'Accademia di Francia a compiere studi sulla forza dell'aria, della polvere da sparo e dell'acqua fatta evaporare con il fuoco al fine di offrire nuove fonti di energia per l'artigianato. Pochi anni dopo, nel 1673, dà egli stesso i risultati delle sue esperienze realizzando due motori che sfruttano il potere della polvere da sparo. La concezione è semplice: un cilindro nel quale l'esplosione della polvere spinge lo stantuffo a fine corsa (*si veda la figura a pag. 37*). L'interesse del progetto risiede nel fatto che la parte del moto utilizzata non è quella espansiva, che difficilmente i meccanismi del tempo avrebbero potuto sfruttare, ma quella impulsiva, determinata dalla pressione atmosferica sul pistone, all'atto della diminuzione del calore. Huygens aveva messo a frutto gli studi sviluppati in tutta l'Europa sulla pressione atmosferica, e che erano culminati pochi anni prima nel suggestivo esperimento di Guericke.

Quello di Huygens era tuttavia solo un esperimento, e la difficoltà di rinnovare la carica di esplosivo limitava notevolmente le possibili applicazioni del motore per compiere un lavoro continuativo. Huygens comprese tuttavia l'importanza dell'esperienza e si lanciò in voli di fantasia, che un giorno sarebbe divenuta realtà, sulle possibili applicazioni del nuovo motore, dalla propulsione terrestre a quella aerea.

Doveva essere l'assistente di Huygens, Papin, ad avere l'idea di ottenere lo stesso effetto della polvere da sparo usando un mezzo ben piú trattabile e meno « esplosivo »: il vapore.

Il meccanismo è strettamente ricalcato da quello di Huygens (*si veda la figura in alto a fronte*): un cilindro che agisce allo stesso tempo anche da caldaia. Per ottenere la dilatazione e la contrazione il cilindro deve essere alternativamente posto e allontanato dal fuoco. È interessante notare come anche in questo caso l'esperienza di Papin sfrutta il processo impulsivo (di condensa) e non già quello espansivo del vapore; concepisce dunque un motore atmosferico.

Entro pochi anni, tuttavia, Papin affina il suo progetto (*si veda la figura in basso a fronte*). Ora il motore si presenta con parti ben distinte, una caldaia, munita perfino di una valvola di sicurezza embrionale, con un cilindro separato, e uno stantuffo a questo collegato. Ma Papin non si sente soddisfatto, cerca ancora di perfezionare il suo meccanismo, e soprattutto di calcolarne le parti, il funzionamento, la resa. Su questo argomento ha un lungo scambio epistolare con Leibniz e la lettura della sua corrispondenza con il filosofo tedesco è al riguardo significativa: anche scorrendola rapidamente sembra di trovarsi di fronte a due progettisti moderni, che di ogni parte del meccanismo, al tavolino, studiano le dimensioni e il funzionamento, calcolando le resistenze, le dispersioni di energia, la resa. Non si dimentichi che il filosofo tedesco non era nuovo a queste esperienze, e aveva a lungo studiato la possibilità di realizzare un mulino a vento realmente efficiente, progettando anche un sistema di retroazione per il controllo del passo delle pale. Lo stesso sistema di retroazione progettato da Leibniz per il mulino a vento, sarà adottato qualche anno dopo da Watt per il controllo del movimento della sua macchina a vapore.

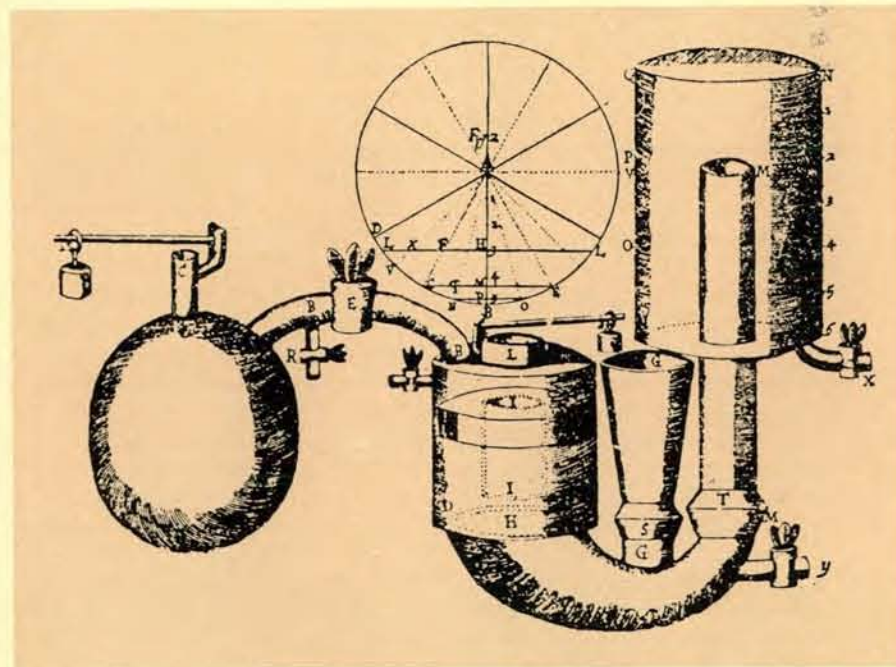
Con Papin il motore a vapore si avvia verso la maturità. Si può dire che la fase dell'invenzione sia ormai passata. Lo stesso anno della progettazione della seconda macchina di Papin, in Inghilterra Tomas Savery realizza il suo « amico del minatore », del quale abbiamo già parlato e che, nonostante la sua embrionalità, è la prima macchina a vapore a trovare uno sfruttamento pratico. Pochi anni dopo, nel 1711-12, Newcomen costruisce la prima macchina atmosferica a vapore a stantuffo, della quale si inizia la produzione in grande scala. Il motore a vapore è ormai nato.

La storia successiva appartiene a un altro capitolo, non a quello dell'ideazione e della progettazione, ma a quello del perfezionamento tecnologico e della produzione industriale. Cerchiamo ora di trarre le conclusioni di questa breve rassegna di quindici secoli di storia del motore a vapore.

L'idea della possibilità di sfruttare la forza del vapore nasce nel II secolo dopo Cristo, nel contesto di una società altamente evoluta, nella quale tuttavia la separazione fra scienza e società, da un lato, e le forti deficienze nel campo della metallurgia, dall'altro, impediscono uno sviluppo ulteriore. L'intuizione è presente, ma mancano le basi economico-sociali e tecniche per un successivo sviluppo.

L'idea rimane latente per circa un millennio, forse comparendo a sprazzi, ma senza lasciare tracce. Una nuova fonte di energia occupa la mente dei tecnici, e il vapore rimane confinato, nell'alchimia, a forza magica.

Con il rinnovarsi degli studi classici, e in un nuovo contesto economico e sociale nel quale la ricerca di una nuova fonte di energia diviene una esigenza profondamente sentita, il vapore fa la sua ricomparsa, e accanto alla pura ideazione delle macchine incontriamo seri tentativi di sistematizzazione e di calcolo della nuova forza. Scienza e tecnica si fondono; fisici e matematici partecipano alle ricerche dei meccanici sperimentatori. Intanto la metallurgia ha fatto passi da gigante. Le esperienze nel campo della fusione dei cannoni e delle munizioni, con piccolissime tolleranze, hanno reso possibile la produzione di stantuffi a tenuta.

Alla fine del XVII secolo matura cosí, dopo quindici secoli, l'idea dello sfruttamento della forza del vapore, in un clima di collaborazione tra ricerca pura, ricerca applicata e maturazione tecnologica. La costruzione del motore a vapore appare cosí quasi la prima realizzazione tecnologica del nuovo spirito di ricerca del mondo moderno, una realizzazione che da frutto si trasforma ben presto in seme del rinnovamento del mondo moderno.

Inquinamento da mercurio

Questo metallo è molto diffuso nell'ambiente per lo piú sotto forme e in quantitativi non pericolosi. Non sappiamo però se la sua concentrazione in seguito a processi industriali e biologici danneggi gli esseri viventi

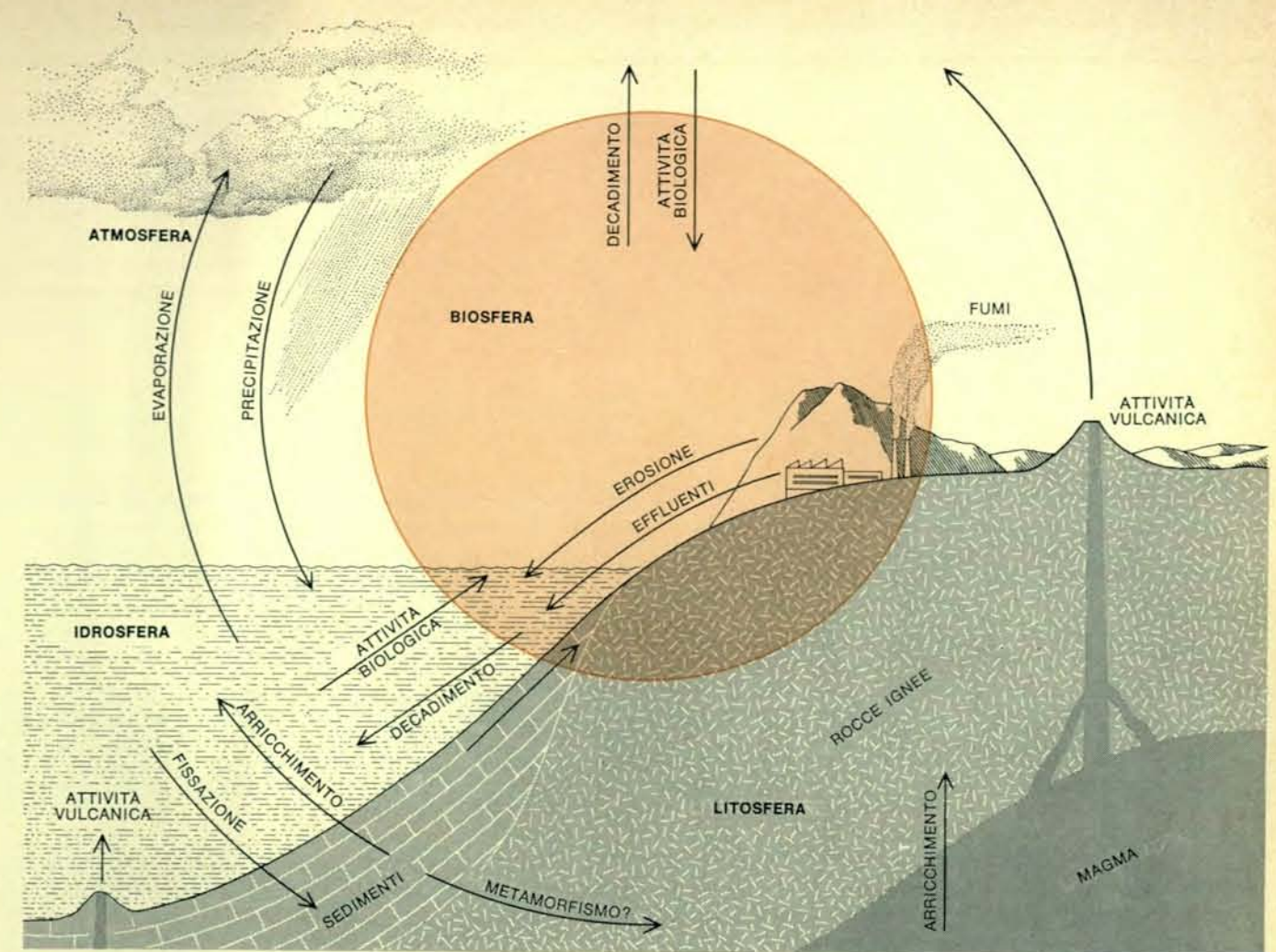
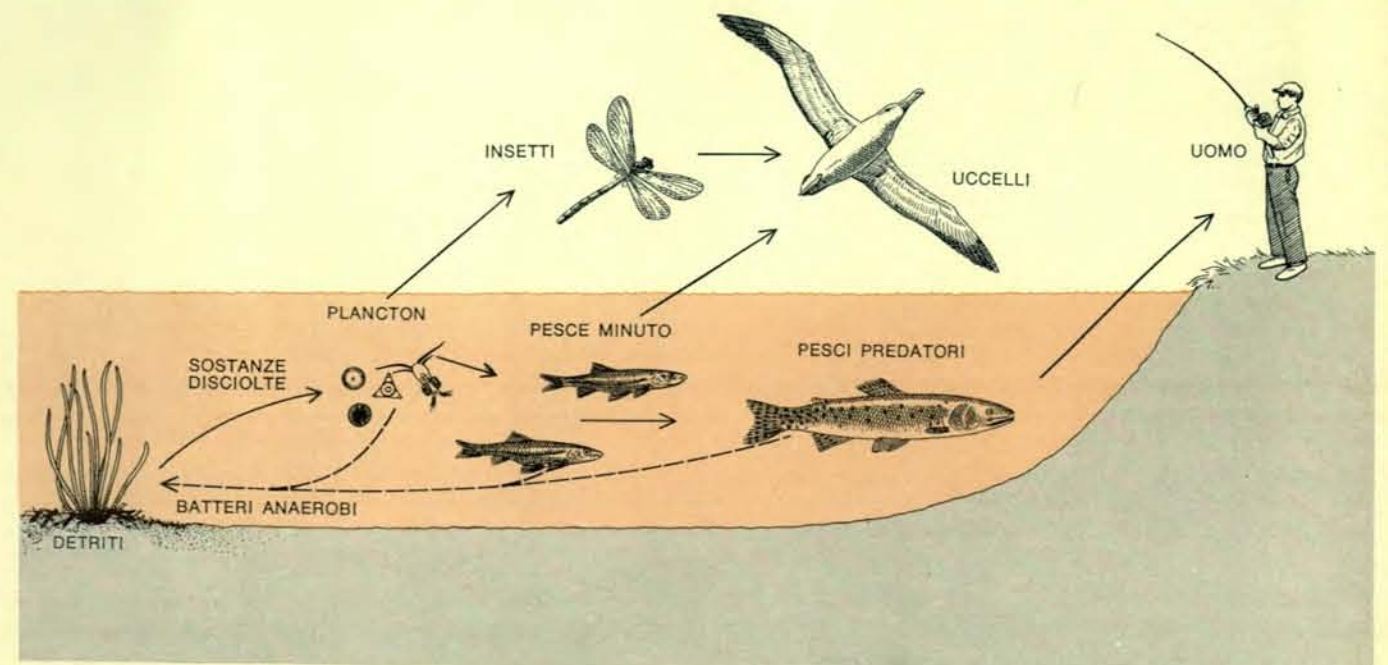
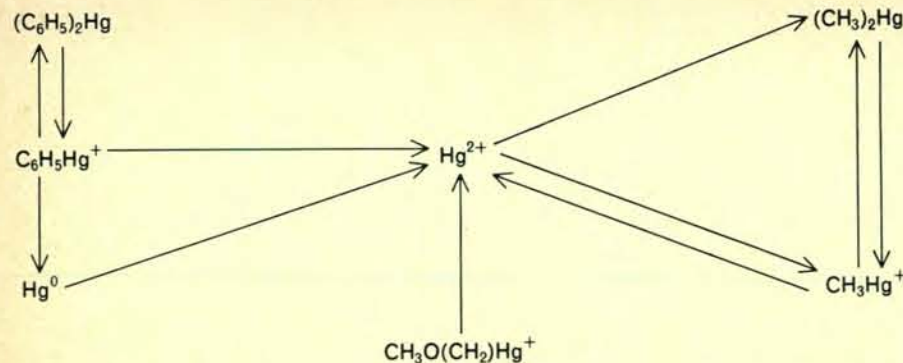
di Leonard J. Goldwater

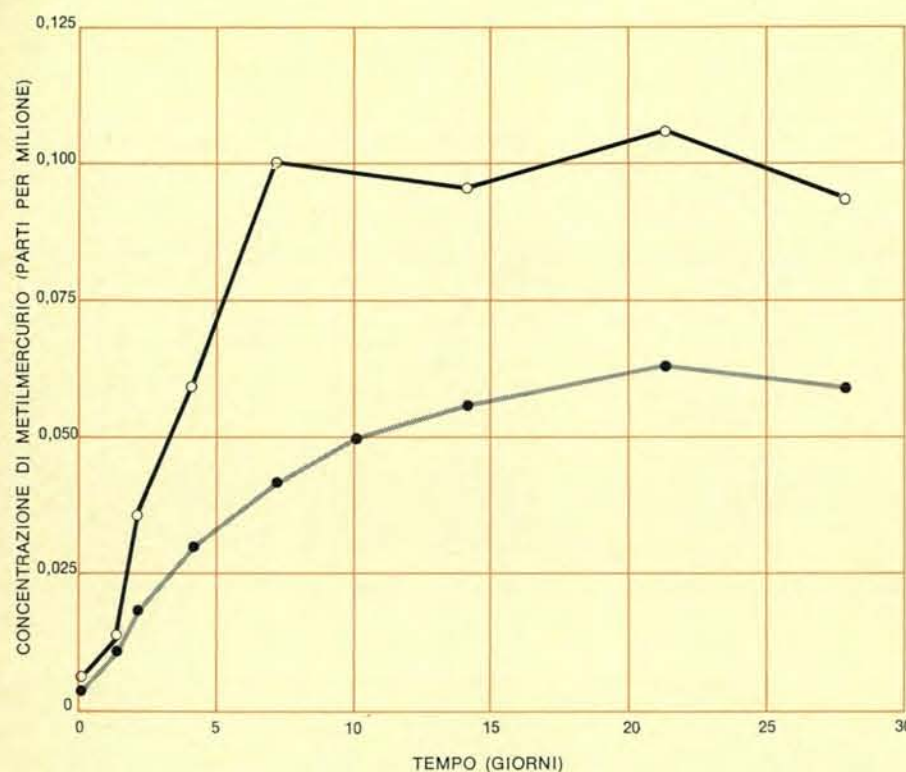
Nei primi anni cinquanta i pescatori del golfo di Minamata, in Giappone, vennero colpiti insieme alle loro famiglie da una malattia sconosciuta, che danneggiava il sistema nervoso. Il morbo di Minamata, cosí venne chiamata la malattia, provocava un progressivo indebolimento muscolare, una menomazione della vista e di altre funzioni cerebrali fino alla paralisi e, in certi casi, al coma e alla morte. Le vittime mostravano lesioni strutturali al cervello. Si osservò ben presto che anche gli uccelli di mare e i gatti, i quali, come la popolazione dei pescatori, si nutrivano essenzialmente di pesce, presentavano i sintomi della medesima malattia. Questo fatto portò alla scoperta di un'elevata concentrazione di composti del mercurio nel pesce e nei frutti di mare pescati nella baia e la sorgente dell'inquinamento venne rintracciata negli scarichi di una fabbrica.

Da allora si sono registrati diversi altri incidenti allarmanti. Nel 1956 e nel 1960, in Iraq, centinaia di persone rimasero vittime di avvelenamenti da mercuriali per avere mangiato del grano trattato con fungicidi a base di mercurio, destinato unicamente alla semina. Casi analoghi si verificarono successivamente in Pakistan e in Guatemala. In Svezia, dove nel 1960 si osservarono i primi casi di avvelenamenti di uccelli e di altra selvaggina, provocati verosimilmente da sementi trattate con mercuriali, il Consiglio Medico Nazionale nel 1967 dovette proibire la vendita del pesce pescato in una quarantina di laghi, essendosi riscontrata nelle carni la presenza di elevati quantitativi di metilmercurio. Nel 1970 l'allarme per l'inquinamento da mercurio raggiunse punte drammatiche nell'America settentrionale. In seguito alla scoperta di elevati quantitativi di mercurio nel lago Saint Clair, a opera di un ricercatore norvegese che lavorava in Canada, si dovettero imporre delle restrizioni sulla pesca e sulla vendita del pesce in diverse zone del Canada e degli Stati Uniti e in entrambi i paesi gli organi statali presero delle iniziative per controllare lo scarico di acque contenenti mercurio entro laghi e corsi d'acqua.

Rapidamente, quasi dalla sera alla mattina, si è diffuso un vivo timore per la presenza di mercurio nell'ambiente in cui viviamo. Questo allarme è comprensibile. Il mercurio è sempre stato considerato una sostanza magica e un po' sinistra, in parte a causa della sua straordinaria caratteristica di essere il solo metallo liquido a temperatura ambiente. Le peculiarità del mercurio erano ben note fin dal Medioevo, quando gli alchimisti presero a interessarsi vivamente alle proprietà affascinanti dell'elemento. La sua tossicità era cosí ben conosciuta che diversi composti del metallo furono usati come veleno per molti assassini e suicidi. Vi sono indizi che portarono a pensare che Napoleone, Ivan il Terribile e Carlo II d'Inghilterra siano morti per avvelenamento da mercuriali, accidentale o deliberato che fosse (Carlo II faceva esperimenti con il mercurio nel suo laboratorio). Si è suggerito (erroneamente) che sia stato il mercurio a fare impazzire il cappellaio di Lewis Carroll, dal momento che il mercurio viene utilizzato per la fabbricazione dei cappelli di feltro. È invece storicamente accertato che un cittadino di Finale Ligure nel 1700 intraprese un'azione legale contro una officina che fabbricava cloruro di mercurio e i cui fumi intossicavano la cittadinanza.

In ogni modo, per quanto i recenti incidenti diano adito a preoccupazioni ben giustificate riguardo al pericolo potenziale di gravi fenomeni di inquinamento, un timore eccessivo sarebbe ingiustificato. Il mercurio, dopo tutto, è un elemento raro, solo il sedicesimo a partire dal basso nella tabella di abbondanza degli elementi sulla Terra. Il peso di tutto il mercurio esistente sulla Terra è meno di 30 miliardesimi del peso della crosta terrestre. Vi sono relativamente pochi luoghi in cui il mercurio si trovi in quantitativi piú consistenti di semplici tracce, mentre i depositi di minerali di mercurio sfruttabili commercialmente sono cosí rari che pochissime miniere sparse un po' dovunque coprono la quasi totalità della produzione mondiale. L'elemento libero allo stato liquido non è velenoso; se ne può inghiottire anche piú di mezzo chilo senza che compaiano fenomeni di avvelenamento. Non si deve pure dimenticare che diversi composti del mercurio sono stati impiegati senza danno per migliaia di anni, e alcuni di essi lo sono ancora, come medicamenti efficaci per svariate malattie. Non dobbiamo guardare al mercurio come a una minaccia particolarmente grave. Quello che si deve fare oggi è un'indagine accurata su come il mercurio viene ridistribuito e concentrato nell'ambiente in seguito alle attività dell'uomo e sotto quali forme e in quali composti si riveli dannoso per gli esseri viventi. Ampie ricerche in questo senso sono già in corso.

Consideriamo dapprima quella che si potrebbe chiamare la distribuzione naturale del mercurio sulla Terra. L'elemento si trova in tracce in tutta la litosfera (il suolo terrestre), l'idrosfera, l'atmosfera e la biosfera (nei tessuti delle piante e degli animali). Nelle rocce e nei terreni (a eccezione dei minerali specifici) il mercurio si trova in concentrazioni dell'ordine di una parte per milione, fatta eccezione per i terreni superficiali ricchi di humus dove può raggiungere le due parti per mi-

Il ciclo del mercurio distribuisce il metallo nella litosfera, idrosfera, atmosfera e nella biosfera, che si estende nelle tre precedenti. Il mercurio è presente ovunque in tracce, ma tende a concentrarsi in seguito a processi biologici. Le attività dell'uomo, in particolare lo sviluppo industriale, possono ora presentare dei pericoli, alterando la distribuzione naturale del metallo.

La catena alimentare degli organismi acquatici costituisce un importante meccanismo di concentrazione del mercurio. A ogni livello trofico l'escrezione è inferiore all'assunzione, cosicché le alghe contengono piú mercurio dell'acqua, ma meno dei pesci che si cibano di alghe e cosí via. I batteri e i processi putrefattivi convertono i composti del mercurio in metilmercuriali.

I composti metilati del mercurio sono i piú pericolosi. Secondo Arne Jernelöv, del Laboratorio svedese di ricerca sull'inquinamento delle acque e dell'atmosfera, il mercurio scaricato in acqua sotto varie forme viene convertito a metil e dimetilmercurio da determinati batteri presenti tra i detriti e nel fango (*a destra*). I fenilmercuriali, il metallo e il metossietilmercurio (*a sinistra e in basso*) vengono convertiti in metilmercuriali per lo piú dopo essere passati attraverso lo stadio di ione mercurico.

lione. Nell'idrosfera (i mari e le acque dolci) si trova generalmente in parti per miliardo. Nell'atmosfera il mercurio si trova sotto forma di vapore oppure di particelle assai piccole. In ogni caso, in condizioni normali, la concentrazione del mercurio nell'atmosfera è cosí piccola che occorrono metodi particolarmente sensibili per misurarla; le misure fatte finora in un numero limitato di luoghi indicano che la concentrazione naturale del mercurio nell'atmosfera è inferiore a una parte per miliardo. La situazione è alquanto diversa quando si viene alla biosfera. Le piante e gli animali tendono a concentrare il mercurio; si è trovato, per esempio, che alcune alghe marine contengono mercurio in concentrazioni 100 volte maggiori dell'acqua in cui sono immerse e in una ricerca condotta sui pesci di mare si sono rilevate concentrazioni di mercurio fino a 122 parti per miliardo. Vi sono poi delle variazioni notevoli, come vedremo, nel contenuto di mercurio delle piante e degli animali, a seconda delle circostanze. In ogni caso, in condizioni naturali, la concentrazione del mercurio nelle piante (a parte quelle coltivate) è in media molto meno di una parte per milione.

Sören Jensen e Arne Jernelöv hanno determinato la velocità di conversione di composti inorganici in metilmercurio nei sedimenti, misurandone la concentrazione a intervalli di alcuni giorni dopo l'aggiunta di 10 (*in grigio*) e 100 (*in nero*) parti per milione di mercurio inorganico. A concentrazioni inferiori la metilazione può non avvenire.

Quindi il ciclo naturale del mercurio sulla Terra (*si veda la figura in alto a pagina 41*), distribuisce il metallo sulla superficie della Terra in quantitativi cosí piccoli da non essere pericolosi per gli esseri viventi. Di che entità è l'alterazione di questa distribuzione in seguito alle attività umane?

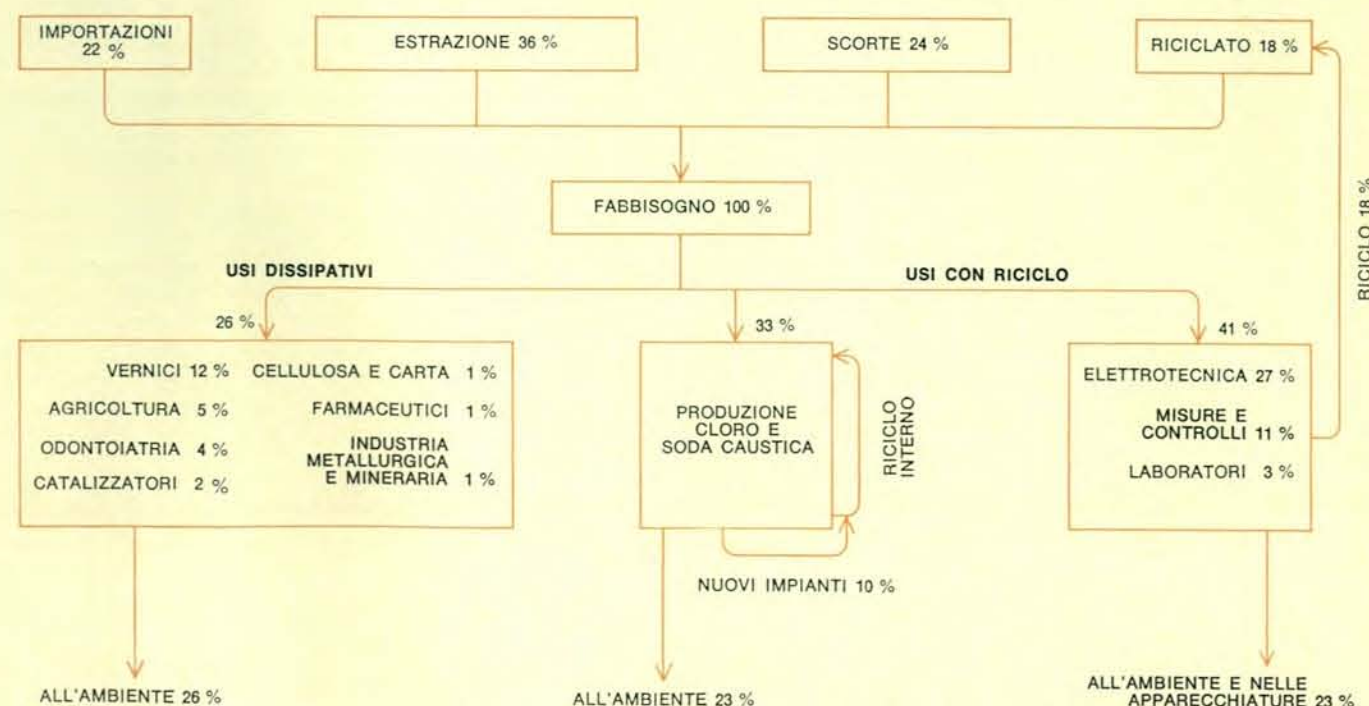
Il solo minerale che contenga mercurio in concentrazioni sufficienti per l'utilizzazione industriale è il cinabro, o solfuro di mercurio (HgS). Depositi sfruttabili di cinabro si trovano in svariate parti della Terra e gli uomini li utilizzarono fin dai tempi preistorici. Vi sono prove che cave di cinabro erano in funzione in Cina, Asia Minore, nelle Cicladi e in Perú almeno due o tre millenni fa. Il cinabro, un minerale rosso brillante, venne usato dapprima come pigmento e solo nel Medioevo medici e altri studiosi presero a estrarre il mercurio dal minerale per preparare medicine e altre sostanze utili. Si pensa che Ippocrate abbia prescritto il solfuro di mercurio come medicamento; si tratta quindi di uno dei primi composti di un metallo utilizzato per fini terapeutici.

Nel Medioevo, quando gli alchimisti avevano imparato a preparare i cloruri, gli ossidi e diversi altri composti inorganici e miscele a base di mercurio, il suo uso come medicamento cominciò a diffondersi. Il calomelano (cloruro mercuroso Hg_2Cl_2) venne largamente usato come purgante e, nel sedicesimo secolo, vennero introdotti dei composti del mercurio per la cura della sifilide. Nel 1800 gli scaffali delle farmacie erano pieni di farmaci mercuriali. Diversi di questi sono ancora elencati nelle farmacopee; i piú interessanti oggi sono i diuretici. È stato trovato che anche tra i composti organici del mercurio ve ne sono alcuni utilizzabili con tranquillità. A un paziente sono stati somministrati qualcosa come 78,5 grammi di mercurio sotto forma di un composto organico senza che insorgessero effetti collaterali.

L'uso del cinabro come pigmento e di altri composti del mercurio come medicine, se fatto con attenzione, non può deteriorare le caratteristiche dell'ambiente. Seri problemi sono sorti invece con lo sviluppo di altre applicazioni, in particolare nell'industria e nell'agricoltura. L'estrazione del mercurio dal minerale mediante arrostimento, nel corso del quale il metallo distilla, contamina pericolosamente l'atmosfera nei dintorni del forno, per lo svilupparsi di fumi contenenti vapori e polveri di mercurio (come ha osservato quel contadino di Finale quasi tre secoli fa). Oggigiorno il mercurio viene usato in quantitativi piuttosto grandi nell'industria chimica, per la fabbricazione di vernici e della carta e per la produzione di insetticidi e fungicidi agricoli. La produzione mondiale di mercurio è oggi di circa 10 000 tonnellate annue, 3000 delle quali vengono usate negli Stati Uniti (i principali produttori sono la Spagna, le cui miniere di Almadén sono le piú ricche del mondo, l'Italia, la Russia, la Cina, il Messico e gli Stati Uniti). Dagli impianti in cui si utilizza mercurio in grossi quantitativi furiescono effluenti liquidi e gassosi che contaminano l'aria, il suolo e le acque.

In agricoltura si usa il sublimato corrosivo ($HgCl_2$) per disinfettare le sementi e per curare diverse malattie dei tuberi, rizomi e bulbi (ivi comprese le patate). I cloruri di mercurio, sia il mercurico che il mercuroso, si usano anche per proteggere diverse colture. Negli ultimi decenni gli agricoltori europei e americani hanno adottato vari composti organici del mercurio, tutti altamente tossici, principalmente come fungicidi per sementi, piante, frutta e verdure. Queste sostanze rappresentano una minaccia potenziale per la salute in seguito all'ingestione delle sementi avvelenate da parte di uccelli, animali terrestri e di persone, in seguito all'accumulo del mercurio nelle piante commestibili e in seguito al dilavamento dei campi da parte della pioggia, che trasferisce il mercurio nelle acque superficiali. Il Servizio geologico degli Stati Uniti, dopo aver misurato la concentrazione del mercurio in vari fiumi nel 1970, riferí che, malgrado il contenuto del metallo fosse nella maggior parte dei casi di una parte per 10 miliardi e anche meno, in alcune acque naturali si potrebbero raggiungere concentrazioni cento volte superiori.

Al fine di valutare i rischi connessi con la presenza del mercurio nell'ambiente, è indispensabile esaminare le forme sotto cui si presenta e valutare la tossicità relativa dei suoi vari composti. Il mercurio puro allo stato liquido, come abbiamo già notato, non è tossico per l'uomo in condizioni normali. Però l'inalazione di vapori del metallo può essere pericolosa. Nei casi gravi essa provoca l'irritazione e la distruzione dei tessuti polmonari, con sintomi quali brividi, febbre, tosse e una sensazione di oppressione al petto. Si conoscono casi di decesso in seguito ad avvelenamento acuto per inalazione di vapori di mercurio, cosa che peraltro non può accadere in seguito a inquinamento generale dell'ambiente ma solo a causa di qualche incidente: come il riscaldamento accidentale di qualche composto. Piú comune è una forma di avvelenamento cronico in seguito all'esposizione per ragioni professionali a vapori di mercurio, per esempio nei minatori delle cave di cinabro e negli operai delle fabbriche di cappelli di feltro, dove si impiega nitrato di mercurio. Questi avvelenamenti cronici, come abbiamo riscontrato nel caso di alcuni minatori, non provocano necessariamente l'inabilità al lavoro. I sintomi sono costituiti da tremito, infiammazione delle gengive e irritabilità generale.

I sali solubili del mercurio sono da lungo tempo noti per essere tossici. Il bicloruro di mercurio (sublimato corrosivo), che è stato impiegato per svariati suicidi e assassini, se preso per bocca in dosi massiccia, produce ulcerazioni del tratto intestinale (provocando una diarrea sanguinolenta), lesioni renali, blocco urinario e infine la morte per insufficienza renale. Il suo impiego a piccole dosi per via orale nella cura della sifilide, ormai abbandonato, non produceva peraltro sintomi di avvelenamento nella quasi totalità dei casi. Il cloruro mercuroso è meno solubile del sale mercurico e di conseguenza è meno pericoloso. Trova tuttora delle indicazioni farmaceutiche, ma alcuni dei suoi impieghi sono stati abbandonati, in quanto si è trovato che provoca ulcerazioni dolorose nelle mani e nei piedi dei bambini e ha altri

Schema dell'utilizzazione del mercurio negli Stati Uniti per il 1968. Lo schema si basa su quello preparato da Robin A. Wallace, William Fulkerson, Wilbur D. Shults e William S. Lyon dello Oak Ridge National Laboratory. L'uso principale del mercurio è come catodo per la preparazione elettrolitica della soda caustica e del cloro. In questo processo si ricicla continuamente una gran massa di mercurio, ma nel 1968 il 23 per cento del metallo utilizzato servì per rimpiazzare quello che era andato disperso. Un altro 10 per cento è stato utilizzato per la messa in funzione di nuovi impianti. Da allora la legislazione e le contestazioni legali hanno obbligato le fabbriche a migliorare i sistemi di riciclo, riducendo nettamente gli effluenti.

effetti secondari. Tra gli altri mercuriali inorganici, alcuni ossidi, come l'ossido rosso usato per pitture marine antivegetative, possono essere potenzialmente pericolosi. In ogni caso questi mercuriali inorganici non contribuiscono in maniera particolare all'inquinamento dell'ambiente.

Quello che oggi ci preoccupa è invece l'inquinamento da parte di composti organici del mercurio, in particolare gli alchili, metil ed etilmercurio. Le sostanze che avevano avvelenato il pesce e gli abitanti del golfo di Minamata furono identificate come metilmercuriali. Il grano che ha provocato l'avvelenamento e la morte degli agricoltori iracheni era stato trattato con etilmercurio-*p*-toluensolfoanilide. E composti similari furono incriminati anche per gli incidenti occorsi in Svezia e in altri luoghi.

Si sapeva già da qualche tempo che gli alchilmercuriali possono provocare un ritardo mentale, ma recenti lavori sperimentali hanno dimostrato che possono provocare anormalità nei cromosomi e, per intossicazione del feto entro l'utero, possono esser causa di qualche forma di paralisi. Gli alchilmercuriali attaccano le cellule nervose, particolarmente sensibili al mercurio sotto questa forma. Da un punto di vista chimico, questo effetto sembra doversi attribuire alla notevole affinità del mercurio per lo zolfo, in particolare per i gruppi solfidrile (–SH) presenti nelle proteine (per i quali il piombo e l'arsenico presentano pure grande affinità). Legandosi alle proteine della membrana cellulare, il mercurio può alterare la distribuzione degli ioni, cambiare i potenziali elettrici e di conseguenza interferire con gli scambi che avvengono attraverso la membrana. Pare anche accertato che il legarsi del mercurio alle proteine faccia alterare il normale funzionamento di strutture subcellulari quali i mitocondri e i lisosomi. Gli alchilmercuriali sembrano particolarmente pericolosi perché il mercurio vi è strettamente legato a un atomo di carbonio, cosicché la molecola viene difficilmente demolita e può continuare la sua azione distruttiva per settimane o per mesi. Sotto questo aspetto differiscono dai composti inorganici e dai fenil (aril) mercuriali e ciò potrebbe spiegare come mai essi producano dei danni permanenti alle cellule nervose, mentre i danni provocati dai composti inorganici e dagli arilmercuriali sono quasi invariabilmente reversibili.

Un tempo si riteneva che gli arilmercuriali (composti organici contenenti anelli benzenici) avessero un'azione simile a quella degli alchilmercuriali. Invece, in seguito a un'ampia serie di ricerche, iniziate da me nel 1961 presso la Columbia University School of Public Health, si è trovato che i lavoratori che maneggiavano in continuazione simili sostanze, rimanendovi esposti ben oltre i limiti che si ritenevano di sicurezza, non presentavano alcun segno di effetti tossici.

S. H. Williston ha misurato il tasso di mercurio nell'atmosfera in una stazione di rilevamento a sud di San Francisco. La concentrazione media è di 0,0002 microgrammi per metro cubo d'aria quando il vento soffia dal Pacifico (*a*) e leggermente superiore quando soffia dalla zona non industrializzata a sud-est della città (*b*). Quando il vento proviene dalla zona industrializzata di nord-est, la media sale a 0,008 microgrammi, con picchi fuori scala che superano 0,02 microgrammi (*c*). Il mercurio è spesso associato a polveri.

Esaminata la natura del pericolo costituito dal mercurio e l'entità della sua presenza nell'ambiente, si deve prestare attenzione all'altro lato del problema: la durata dell'esposizione al pericolo e la risposta dell'uomo a questo fattore.

Senza ombra di dubbio la fonte principale da cui l'uomo assume il mercurio è costituita dal cibo. Il tedesco Alfred E. Stock ha iniziato la determinazione della concentrazione del mercurio nei cibi già nel 1930 e da allora si sono susseguite diverse ricerche analoghe, tra cui quella del nostro gruppo presso la Columbia University nel 1964, e parecchie altre sono attualmente in corso. Le concentrazioni misurate in campioni di varia provenienza sono dell'ordine delle frazioni di parte per milione (*si veda la tabella in questa pagina*), ma nel pesce proveniente da acque inquinate possono raggiungere livelli centinaia di volte piú elevati. Una commissione congiunta della FAO e dell'Organizzazione Mondiale per la Sanità ha proposto nel 1963 che il limite superiore ammissibile per la presenza del mercurio nei cibi fosse stabilito in 0,05 parti per milione, a eccezione del pesce e dei frutti di mare. In ogni caso non vi sono a tutt'oggi delle ragioni valide per stabilire quale dovrebbe essere il limite di sicurezza. Probabilmente la conclusione piú significativa che si possa trarre dagli studi compiuti consiste nel fatto che, in generale, la concentrazione del mercurio nei cibi non pare cambiata in maniera sostanziale nel corso degli ultimi trent'anni. I confronti possono però non essere del tutto validi, a causa della diversità dei metodi analitici impiegati.

In aggiunta al cibo, nella vita di ogni giorno troviamo svariate altre possibilità di assunzione del mercurio. Esso viene impiegato piuttosto frequentemente negli antisettici, nelle vernici, nelle cere per pavimenti, nei prodotti lucidanti per mobili, negli ammorbidenti per tessuti, nei filtri per i condizionatori d'aria e nei preparati usati in lavanderia per impedire che i tessuti ammuffiscano. E senza dubbio vi sono altre possibilità di assunzione insospettate. In seguito alle considerazioni fatte non ci si può sorprendere quando si scopre che dal 20 al 25 per cento della popolazione « normale », vale a dire persone che non hanno avuto contatto con mercuriali per ragioni professionali o di cura, reca nei fluidi corporei delle concentrazioni non indifferenti del metallo. Su questo problema sono state condotte varie ricerche, tra cui una piuttosto estesa a livello internazionale, condotta da noi tra il 1961 e il 1963 presso la Columbia University, in collaborazione con l'Organizzazione Mondiale per la Sanità. Analizzando 1107 campioni di urina di soggetti normali, raccolti in 15 Paesi, trovammo che, tranne rare eccezioni, il contenuto di mercurio non superava le 20-25 parti per miliardo. Un'indagine del tutto simile su campioni di sangue permise di concludere che il piú elevato contenuto di mercurio nel sangue di soggetti normali non superava le 30-35 parti per miliardo. E analisi di tessuti prelevati nel corso di autopsie indicarono che nei vari organi il mercurio si trova in quantitativi del tutto simili.

È importante considerare questi fatti nel contesto della evoluzione della vita sul nostro pianeta, in contatto continuo con tracce di mercurio. Senza ombra di dubbio questo elemento era onnipresente nell'acqua di mare, dove è iniziata la vita, fin dall'inizio di questa e probabilmente le tracce di mercurio che ritroviamo in tutte le piante e gli animali sono una conseguenza di una situazione primordiale. L'uomo, che si trova al termine della catena alimentare, deve avere contribuito notevolmente a mantenere un certo tasso di mercurio nel suo corpo alimentandosi con pesce e con altri organismi in grado di concentrare il mercurio. Nel corso di milioni di anni, esso ha probabilmente migliorato la sua tolleranza per il mercurio. In effetti l'induzione di una tolleranza per molti prodotti chimici è un fatto oggi ben conosciuto. Questo fatto era già noto piú di 2000 anni fa, quando Mitridate re del Ponto tentava di immunizzarsi ai veleni assumendone dosi crescenti. La tolleranza per una determinata sostanza frequentemente si trasforma in una necessità e pare ragionevole pensare che l'uomo, come anche gli altri esseri viventi, abbia ora necessità di piccole quantità di mercurio, come di altri oligoelementi. Gli effetti benefici o dannosi del mercurio dovrebbero dipendere moltissimo dalla forma sotto cui viene incorporato nei tessuti, dal dosaggio e probabilmente anche da altri fattori. Per esempio, si è trovato che quell'elemento assai tossico che è l'arsenico può essere presente in gamberi perfettamente sani in concentrazioni dell'ordine delle 200 parti per milione (peso secco), sotto forma di trimetilarsina. In questo caso la metilazione sembra sopprimere la tossicità dell'arsenico. Il comportamento biochimico di questo elemento ha molti aspetti in comune con quello del mercurio, cosa che fa pensare che nei pesci si possano trovare dei mercuriali metilati innocui accanto a quelli velenosi.

La nostra preoccupazione deve quindi essere quella di evitare quelle alterazioni dell'ambiente che possano riflettersi sull'equilibrio naturale dell'elemento in rapporto ad altre sostanze, oppure facilitare la produzione di mercuriali dannosi. Nel caso di Minamata pare

	A	B	C	D	E
CARNE	0,001-0,067	0,005-0,02	0,0008-0,044	0,31-0,36	0,001-0,15
PESCE	0,02-0,18	0,025-0,18	0,0016-0,014	0,035-0,54	0-0,06
VERDURA FRESCA	0,002-0,044	0,005-0,035	0	0,03-0,06	
VERDURA IN SCATOLA			0,005-0,025		0-0,02
LATTE FRESCO	0,0006-0,004	0,0006-0,004	0,003-0,007	0,003-0,007	0,002-0,007
BURRO	0,002 (GRASSI)	0,07-0,28			0,008
FORMAGGIO	0,009-0,01				0,14
FRUMENTO	0,02-0,036	0,025-0,035	0,002-0,006	0,012-0,048	0,18
FRUTTA FRESCA	0,004-0,01	0,005-0,035		0,018	0,002-0,025
ALBUME D'UOVO				0,08-0,125	0,004-0,03
TUORLO D'UOVO				0,33-0,67	0,01
UOVA INTERE	0,002	0,002	0		0,062
BIRRA	0,00007-0,0014	0,001-0,015			0,004

La concentrazione del mercurio negli alimenti è stata misurata da Alfred E. Stock in Germania nel 1934 (*A*) e nel 1938 (*B*), da O. S. Gibbs negli Stati Uniti nel 1940 (*C*), da Y. Fujimura in Giappone nel 1964 (*D*) e dal gruppo dell'autore negli Stati Uniti nel 1964 (*E*). Uno « 0 » significa una concentrazione troppo piccola per essere rilevabile con il metodo impiegato. L'Organizzazione Mondiale per la Sanità ha proposto un limite massimo ammissibile di 0,05 parti per milione nei cibi diversi dal pesce. La Food and Drug Administration ha stabilito negli Stati Uniti un limite di 0,5 parti per milione per il pesce.

Le persone che presentano un elevato tasso ematico di mercurio in seguito a ingestione di pesce contaminato con metilmercurio sono affette da anomalie nei cromosomi. Le microfotografie di cromosomi di linfociti eseguite da Staffan Skerfving dell'Istituto nazionale di igiene in Svezia mostrano un cromosoma incompleto e un frammento isolato (*in alto*) e tre frammenti di cromatidi appaiati, ma privi del centromero (*in basso*).

che si siano verificate entrambe le circostanze. Gli effluenti della fabbrica inquinante contenevano già del metilmercurio, ma contenevano anche del mercurio elementare che veniva metilato da microorganismi presenti nella melma del fondo. Questa conversione è stata poi accelerata dall'elevato contenuto di mercurio e sostanze organiche delle acque della baia, che hanno facilitato la moltiplicazione dei batteri metilanti. Il risultato è stato l'accumulo di mercurio nei pesci fino al valore di 50 parti per milione (peso fresco), che è una concentrazione 100 volte superiore a quella accettata come limite massimo di sicurezza negli Stati Uniti e nel Canada. Gli effetti sulla popolazione sono stati aggravati dal fatto che la loro dieta consisteva quasi esclusivamente di pesce e probabilmente era povera di qualche sostanza essenziale. È noto infatti che le deficienze dietetiche aggravano gli effetti degli agenti tossici.

L'allarme provocato dalla stampa riguardo al problema del mercurio ha creato una situazione che talvolta scivola nell'isterismo. Si propongono e si applicano delle misure « protettive » che non si basano su fatti accertati con sicurezza. Le ricerche sugli effetti tossici del mercurio si sono occupate finora quasi esclusivamente dei rischi professionali, connessi con esposizioni prolungate a mercuriali, che vengono prevalentemente inalati. La presenza di mercurio nell'ambiente al di fuori delle fabbriche solleva dei problemi del tutto diversi. Lo scarico di mercurio nell'atmosfera, sotto forma di vapori o di polveri non pare che possa essere considerato un rischio molto grave. Le principali fonti di inquinamento cui occorre prestare attenzione sono gli scarichi solidi e liquidi, che possono finire nelle acque superficiali minacciando la fauna ittica e chi se ne ciba, e gli impieghi agricoli dei mercuriali, che possono portare alla contaminazione dei cibi. Non vi sono ancora informazioni sufficienti per valutare l'entità di tali pericoli e stabilire quindi delle norme di controllo realistiche.

Tanto per cominciare, occorre conoscere con maggior precisione quella che possiamo considerare come una concentrazione pericolosa di mercurio nel corpo umano. L'analisi della concentrazione dell'elemento nelle urine e nel sangue non ci ha dato finora molti lumi in proposito. Nei lavoratori esposti per ragioni professionali a contaminazione da mercurio, la concentrazione del metallo nelle urine varia moltissimo da un giorno all'altro e da individuo a individuo. Di regola, l'escrezione del mercurio riflette l'entità dell'esposizione, ma recenti indagini su lavoratori dell'industria chimica hanno mostrato che individui esposti a mercuriali in elevate concentrazioni o per lungi periodi spesso non presentano sintomi di alcun genere. Inoltre la presenza di tassi elevati di mercurio nelle urine o nel sangue non sono necessariamente segno di uno stato di intossicazione. Sono stati osservati molti casi di individui con tassi di mercurio 10 o 20 volte superiori al normale senza che presentassero un qualsiasi sintomo di malessere. Insomma vi sono molti dati che portano alla conclusione che qualche fattore esterno è ancora piú importante dell'esposizione ai mercuriali in sé nel determinare la risposta individuale, almeno fino a un certo punto. Ora si stanno studiando altri possibili metodi di diagnosi dell'intossicazione, come l'alterazione di qualche processo enzimatico, ma fino a questo momento non sono stati proposti metodi diagnostici che diano affidamento. E non è neppure possibile stabilire con precisione una soglia di tossicità per l'esposizione di mercuriali o per il loro assorbimento.

D'altra parte si possiede un buon numero di informazioni utili riguardo alle fonti di pericolo e alle vie di contaminazione. Il mercurio, sotto una qualsiasi forma, può entrare nell'organismo attraverso i polmoni, la pelle o per via orale. (Incidentalmente, si è dimostrato recentemente che l'amalgama di mercurio usato per otturazioni dentarie non è pericoloso. La maggior parte delle persone con otturazioni di questo tipo presenta dei tassi di mercurio trascurabili nelle urine e nel sangue). La presenza di mercurio nell'atmosfera è, come abbiamo già visto, un problema locale, importante solo per certi ambienti industriali. Il contatto con la pelle è pure un problema che non riveste importanza generale, per quanto certi mercuriali possano provocare gravi ustioni localizzate (di secondo grado) e si sia osservato un assorbimento misurabile di mercurio proveniente da biancheria e lenzuola trattate con mercuriali.

Per quanto riguarda il cibo, è possibile identificare le possibili fonti di contaminazione. È ben noto che i composti inorganici del mercurio e i fenilmercuriali sono meno tossici dei metilmercuriali. Dobbiamo preoccuparci, però, delle possibilità di conversione dei primi nei secondi, che, per quanto ne sappiamo attualmente, costituiscono il rischio piú grave connesso con la presenza del mercurio nell'ambiente. Un certo numero di fungicidi a base di alchilmercuriali sono stati provvidenzialmente esclusi dall'impiego su coltivazioni alimentari. Gli organi di governo stanno poi prendendo in considerazione la possibilità di proibire l'impiego di altri mercuriali organici quando vi sia possibilità di contaminazione del cibo o dell'acqua.

Il miglior modo di affrontare il problema della presenza di mercurio nell'ambiente consiste nell'applicare quei metodi epidemiologici, di medicina preventiva, di igiene pubblica e industriale che nel passato si sono dimostrati efficaci in altre situazioni. Occorrerebbe mettere a punto i mezzi per effettuare un frequente controllo dell'ambiente, al fine di rilevare con immediatezza eventuali aumenti nel tasso di inquinamento. Si dovrebbe esaminare in massa la popolazione, per scoprire i casi di intossicazione. Sarebbero indispensabili dei controlli per impedire lo scarico di effluenti potenzialmente pericolosi. I mercuriali tossici impiegati nell'industria e nell'agricoltura dovrebbero venire sostituiti con altre sostanze meno tossiche. Naturalmente, per mettere in cantiere un programma del genere sarebbe necessario curare una realistica divulgazione dei problemi connessi, accompagnata da una adeguata azione legislativa. E, soprattutto, queste misure non dovrebbero riguardare solo i mercuriali ma anche tutte le altre sostanze che minacciano la conservazione dell'ambiente.

Sarebbe sciocco dichiarare guerra a oltranza contro il mercurio. L'evoluzione degli organismi viventi ci fa pensare che l'assenza del mercurio potrebbe essere altrettanto pericolosa di un suo eccesso. Nel caso di questo metallo, come sempre accade quando si debbano fronteggiare delle alterazioni nell'ambiente, la miglior soluzione consiste nel mantenere efficienti i meccanismi naturali di regolazione che hanno consentito lo sviluppo della vita sul nostro pianeta.

Fortificazione disegnata durante una crisi di emicrania nel 1870 da un medico inglese, Hubert Airy. La figura ha una forma caratteristica, paragonabile a una doppia C, costituita da bande di linee luminose che si espandono progressivamente nel campo visivo (1-4 e 5-8). In tutti gli esempi il cerchio bianco (0) rappresenta il punto su cui era fissato lo sguardo del soggetto. La figura (9) mostra la forma particolareggiata delle bande, che sono costituite da brevi segmenti lineari disposti ad angolo acuto.

Le visioni allucinatorie che accompagnano l'emicrania

Le percezioni visive allucinatorie che precedono alcuni casi di emicrania fanno ritenere che le cellule nervose della corteccia visiva cerebrale abbiano una configurazione di tipo esagonale

di Whitman Richards

In quale modo il cervello percepisce gli oggetti del mondo esterno? Nel tentativo di rispondere a questa domanda i neurofisiologi, negli ultimi trent'anni, hanno sondato i cervelli di animali, registrandone gli impulsi nervosi e cercando di stabilire in quale modo le varie strutture neuronali rispondano a stimoli di diversa natura. I risultati di questi studi sono in genere di difficile interpretazione. Solo i dati ottenuti dalle aree cerebrali che ricevono le informazioni direttamente dagli organi di senso, dette aree primarie, sono spesso sorprendentemente chiari: si osserva, per esempio, che singoli neuroni rispondono, con modalità che ricordano la legge del tutto o nulla, a stimoli altamente specifici, quali possono essere delle linee di una certa lunghezza e con un certo orientamento. Il comportamento dei singoli neuroni di queste aree cerebrali è in genere cosí strettamente legato alla natura e alle proprietà dello stimolo che ogni cellula può essere considerata come un « rivelatore di caratteristiche » e classificata in base ai fenomeni che ne stimolano l'attività. L'identificazione delle caratteristiche capaci di attivare i neuroni a vari livelli della trasmissione sensoriale rende attuabile il tentativo di ricostruire il metodo utilizzato dal cervello per analizzare ed elaborare le informazioni provenienti dal mondo esterno.

Mentre solo in epoche recenti i neurofisiologi sono riusciti a ottenere prove dirette che indicano a quali caratteristiche dello stimolo rispondono aree cerebrali diverse, già da molti secoli si conoscono indirettamente i principi operativi del cervello. Forse la prova indiretta piú decisiva dell'esistenza di questi rivelatori di caratteristiche ci è fornita dalla nostra esperienza personale in occasione dell'attivamento spontaneo di determinate aree cerebrali. Questa attività interna abnorme si può manifestare naturalmente durante i periodi di stress, che sono generalmente accompagnati da una diminuzione del flusso sanguigno. Fra i possibili risultati di tale attività vi è il mal di testa, oppure una modificazione dell'equilibrio ionico di un'area cerebrale con conseguente scarica spontanea dei suoi neuroni. Infine l'attività spontanea di origine interna può produrre delle percezioni.

Circa il 10 per cento degli uomini soffre di emicrania, e nel 50 per cento circa di tali emicranie sono implicate le aree visive. Quando nel corso dell'emicrania vengono attivate le aree visive, l'individuo vede degli spettacolari spiegamenti di linee e di angoli luminosi che nell'insieme hanno l'aspetto di antiche fortificazioni viste dall'alto. La forma di queste figure fornisce dei validi indizi sul processo di riconoscimento utilizzato dal sistema visivo umano. Sebbene da molti secoli si sia a conoscenza di descrizioni di queste figure, la loro importanza è stata riconosciuta solo cento anni fa, quando George Biddel Airy, l'astronomo reale britannico, e suo figlio, Hubert Airy, registrarono minuziosamente le proprie percezioni visive. In una sorprendente relazione pubblicata nel 1870 Hubert Airy poneva in relazione le figure di tali percezioni con la struttura del cervello e concludeva affermando che le percezioni spontanee probabilmente rappresentavano una « fotografia » realistica del processo di elaborazione cerebrale.

Le percezioni visive che accompagnano le cefalee oftalmiche assumono forme diverse, ma solo quelle di tipo classico, sperimentate dagli Airy e descritte nelle loro relazioni (*si veda la figura nella pagina a fronte*), sono sufficientemente chiare e ben documentate per poter fornire dei dati attendibili sul processo di riconoscimento attuato dal sistema visivo. Desidererei descrivere in modo dettagliato questo tipo di rappresentazioni visive, basando le mie osservazioni quantitative sulle descrizioni fornitemi da una persona (mia moglie) e integrandole con dati raccolti da altri studiosi.

Le alterazioni visive in genere precedono il mal di testa, ma possono verificarsi anche indipendentemente dalle emicranie. In genere l'alterazione inizia a manifestarsi in prossimità del centro del campo visivo come una piccola macchia grigia dai contorni indefiniti. Se questa macchia compare mentre l'individuo sta leggendo, come spesso accade, allora il primo sintomo dell'emicrania è costituito dalle parole che si perdono in un'ombra confusa. Poi, per alcuni minuti, l'area grigia si allarga lentamente, assumendo una forma a ferro di cavallo il cui margine esterno, in progressiva espansione, è delimitato da linee luminose a zig-zag. Queste linee, inizialmente piccole, crescono man mano che l'area cieca si espande e si sposta verso la periferia del campo visivo. Il ritmo di espansione dell'arco formato dalle linee a zig-zag e della relativa area cieca è piuttosto lento, e circa venti minuti separano la comparsa delle prime linee, in prossimità del centro del campo visivo, dalla loro espansione al di là dei limiti dello stesso. È a questo punto che nelle aree retrostanti o soprastanti gli occhi, ha generalmente inizio il mal di testa, l'unica conseguenza sgradevole di una rappresentazione visiva spettacolare.

Grazie alla lentezza con cui questa area di attività si sposta attraverso il campo visivo, è facile riprodurre graficamente la forma e le caratteristiche generali della cosiddetta fortificazione. Il soggetto in genere fissa il proprio

sguardo su un punto di un foglio e poi traccia i contorni delle figure che vede (*si veda la figura in basso*). Raccogliendo una serie di simili disegni è possibile registrare la forma generale degli archi nella loro espansione attraverso il campo visivo (*si veda la figura in alto a pagina 51*). Gli archi disegnati da Hubert Airy cento anni fa corrispondono quasi esattamente a quelli del mio principale soggetto di studio e sono l'elemento di base di tutte le rappresentazioni visive descritte in questo campo.

La rappresentazione degli archi in espansione è simile alle linee di forza di un campo elettrico intorno a una sorgente puntiforme e numerosi ricercatori hanno suggerito che i successivi archi rappresentino un'onda di eccitazione emessa da una singola area della corteccia visiva. Il famoso neuropsicologo K.S.Lashley valutò in base alla propria esperienza che il ritmo di espansione delle fortificazioni era di tre millimetri al minuto. Egli giunse a questa valutazione presupponendo che l'onda di eccitazione si allargasse con un ritmo costante sebbene gli archi sembrassero espandersi con velocità sempre maggiore man mano che si allargavano. Complessivamente questa ipotesi appare accettabile considerando la distribuzione del campo visivo nella corteccia. Infatti un ritmo costante di propagazione dell'onda di eccitazione sarebbe realmente associato a una espansione piú rapida degli archi piú ampi, in quanto la parte periferica del campo visivo corrisponderebbe a una area minore di corteccia cerebrale: poiché la quantità di corteccia per ogni grado di campo visivo diminuisce progressivamente man mano che si allontana dal punto centrale del campo verso i margini, un'onda che si propagasse con un ritmo costante attraverso la corteccia sembrerebbe muoversi sempre piú rapidamente quanto piú essa si avvicina al campo periferico. In base a recenti mappe elettrofisiologiche della topografia del campo visivo nella corteccia striata, ho calcolato che la velocità massima di propagazione di quest'onda è di 3,3 millimetri per minuto, in accordo con la precedente valutazione di Lashley.

Sebbene l'arco delle fortificazioni sia chiaramente visibile in qualsiasi momento, è estremamente difficile ricordare mentalmente o disegnare su un foglio le linee che delimitano tale arco, e sono proprio questi dettagli che rivestono il maggior interesse per chi desideri analizzare i meccanismi cerebrali (*si veda la figura in basso a pagina 51*). Il tipo piú semplice di fortificazione è costituito da un arco dentellato, composto da segmenti paralleli, la cui luminosità è paragonabile a quella di una lampada fluorescente. I segmenti di ogni coppia presentano alternativamente oscillazioni di luminosità di circa 5 cicli al secondo e tutti i segmenti esterni sono accesi quando quelli interni sono spenti e viceversa. A causa di questa sincronizzazione il riverbero dell'intero arco sembra percorso da quello che viene descritto come un movimento di « ebollizione ». Ciò lascia presupporre l'attività di una rete neuronale di inibizione reciproca, per cui l'inibizione di un'area favorirebbe l'attività neuronale spontanea delle regioni circostanti. Se questa attività di tipo antagonistico venisse determinata dall'espandersi dei confini dell'area dell'alterazione corticale, allora la scomparsa delle linee che si trovano al margine esterno di tale area sarebbe seguita dalla loro ricomparsa all'interno di tale margine, cioè in un'area precedentemente inibita.

Oltre alle evidenti proprietà spaziali di queste percezioni, quali le maggiori dimensioni delle linee in corrispondenza dello spostarsi degli archi verso la periferia del campo visivo, vi sono anche sottili effetti legati ai colori, alla direzione delle linee e alle distanze che separano i diversi segmenti. Per la maggior parte di questi elementi spesso non si dispone che di impressioni qualitative. Quando le fortificazioni sono di natura complessa sovente non si riesce a ricordare che un'impressione generale, e i dettagli non sempre sono accurati. L'arco può essere costituito dall'intreccio di cinque o sei linee parallele, spesso difficili da contare poiché attraversano velocemente la figura muovendosi verso l'esterno per cui i margini interni continuano a essere ridefiniti. Fra le linee di questo intreccio spesso appaiono strisce di colore rosso chiaro, giallo e blu, mentre nel caso di rappresentazioni di tipo piú semplice gli stessi colori sono visti solo sulla sommità dei segmenti (simili a capocchie di fiammiferi).

All'interno di ogni arco di fortificazione vi è una temporanea fascia cieca che viene percepita nel momento in cui il soggetto, cercando di disegnare la figura, si rende conto che la punta della matita diviene invisibile quando si trova in corrispondenza della fascia.

Archi dentellati visti e disegnati dal principale soggetto dell'autore (la moglie): nelle linee bianche sono visibili segmenti di colore giallo, arancione e rosso, soprattutto in corrispondenza delle estremità, e anche alcuni tratti blu. Generalmente viene percepito un solo arco alla volta, in cui le linee si illuminano alternativamente, cosí da sembrare percorse da un movimento di « ebollizione ». Lo sguardo è fissato nel punto bianco.

Gli archi si spostano attraverso il campo visivo, come dimostrano i diagrammi basati su descrizioni di Airy. L'alterazione ha inizio come un'area grigia vicino al punto di fissazione che impiega 20 minuti per espandersi sino ai limiti del campo.

Alla luce dei recenti dati ottenuti dai neurofisiologi nello studio di singoli neuroni della corteccia visiva dell'encefalo di gatti e di scimmie, è interessante confrontare le loro descrizioni dei meccanismi visivi con alcune proprietà delle figure di fortificazione. Per esempio, David H. Hubel e T.N. Wiesel hanno dimostrato in animali da esperimento che un tipo di riconoscimento operato dalla corteccia visiva consiste nell'individuazione di linee aventi una determinata lunghezza e un dato orientamento. Le figure di fortificazione fanno pensare che anche il sistema visivo dell'uomo compia una analisi di questo tipo. Il confine esterno, in espansione, dell'alterazione corticale è in realtà un insieme di linee discontinue nello spazio visivo. Se queste linee vengono rappresentate diagrammaticamente in un'ampia gamma di posizioni nel campo visivo, la loro lunghezza appare minore in prossimità del centro del campo e aumenta progressivamente con il distanziarsi da esso. In base alle attuali conoscenze della distribuzione del campo visivo sulla corteccia umana si può valutare a quale lunghezza corrisponda ognuna di queste linee sulla corteccia. Secondo i miei calcoli ogni linea, indipendentemente dalla sua posizione nel campo visivo, rappresente-

I diagrammi illustrano dettagliatamente due tipi di figure, in cui le fortificazioni appaiono senza la caratteristica luminosità intermittente. Il contrasto appare piú evidente nell'arco di tipo semplice (*a*) piuttosto che in quello complesso (*b*). In entrambi i casi l'area grigia indica una fascia transitoria di cecità che si muove verso l'esterno del campo visivo, parallelamente all'arco.

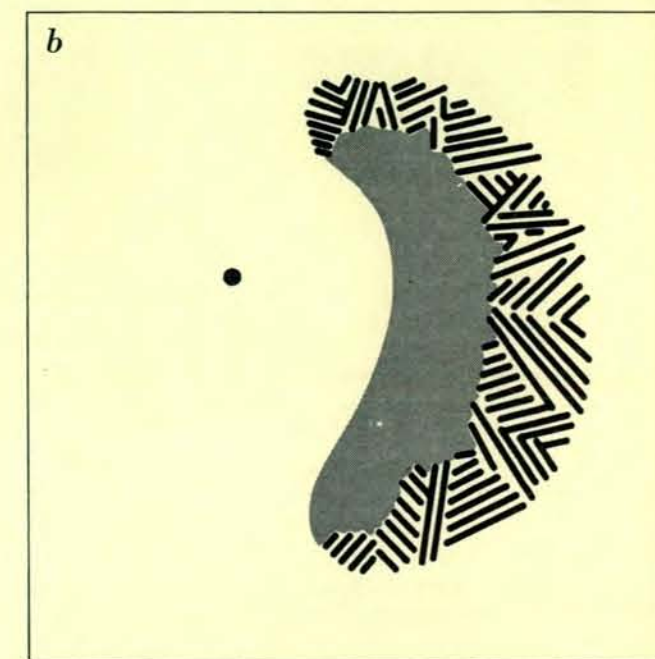
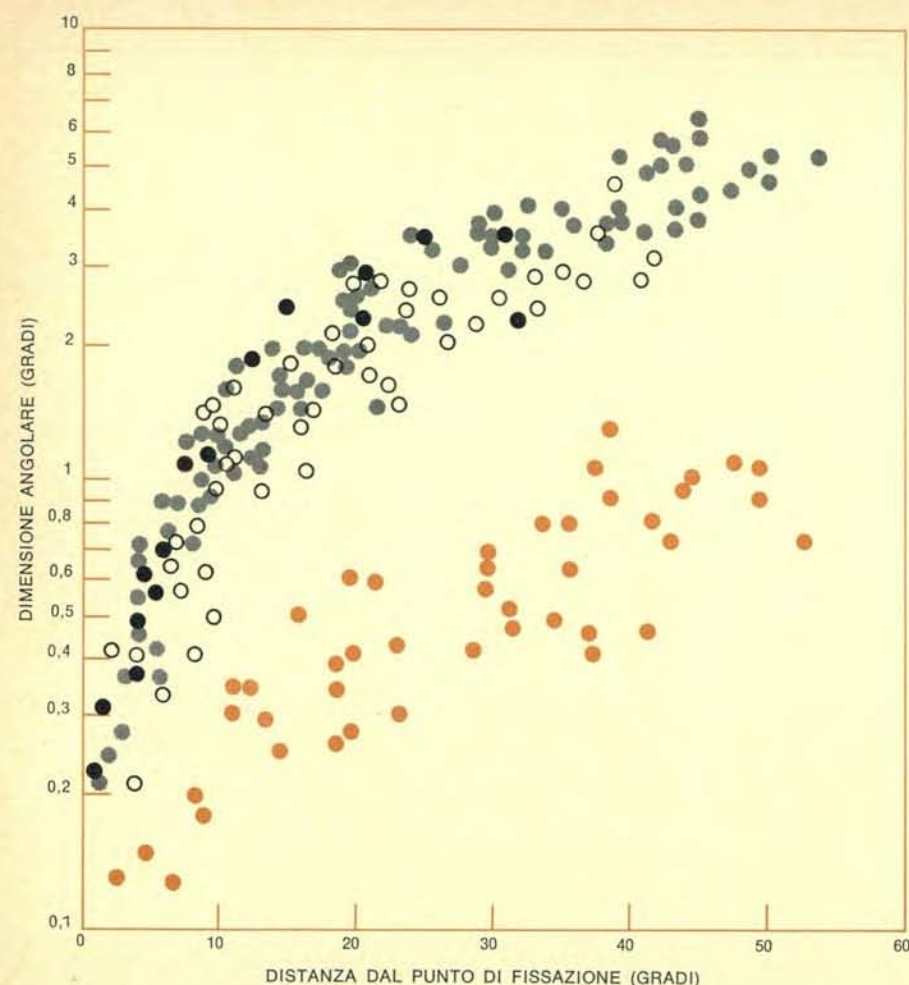



Diagramma della lunghezza e della distanza dei contorni di tre figure in corrispondenza di diversi punti del campo visivo. La lunghezza delle linee (*punti neri, grigi e bianchi*) aumenta parallelamente alla distanza dal punto di fissazione, ma corrisponde sempre a mm 1,2 di corteccia. La distanza tra le linee è rappresentata dai punti colorati.

rebbe 1,2 mm di corteccia, per cui il progressivo aumento delle linee piú lontane dal centro sarebbe solo apparente. La dimensione costante corrispondente alla lunghezza di queste linee sulla corteccia suggerisce che quest'ultima sia organizzata in elementi discontinui di dimensioni costanti. Vernon Mountcastle, Hubel e Wiesel, e altri neurofisiologi hanno infatti dimostrato la presenza di raggruppamenti o « colonne » neuronali, aventi in comune alcune caratteristiche di attivazione, nella corteccia e nelle vie visive. La dimensione di ogni unità sarebbe probabilmente indicata dalla loro dimensione minore, cioè dalla larghezza o distanza delle linee. La distanza fra le linee è circa un quarto della lunghezza di una linea (*si veda la figura in alto*) per cui nell'uomo le piú semplici unità a colonna avrebbero un ipotetico diametro di 0,3 mm.

Oltre ai rivelatori di linee i neurofisiologi hanno individuato analizzatori di strutture piú complesse, quali angoli o punte. Apparentemente questi analizzatori complessi non sono nella corteccia umana a livello dei disturbi emicranici. Le dentellature delle fortificazioni hanno l'apparenza di angoli, ma si potrebbe credere che i neuroni non li rilevino in quanto tali. La maggior parte delle linee non formano degli angoli precisi, ma sembrano piuttosto far parte di una T spezzata in cui non vi è congiungimento fra le due linee che la compongono. Solo poche linee si congiungono realmente e nei rimanenti casi i punti di separazione sembrano essere distribuiti casualmente. Queste distanze di separazione sono percepite con maggiore facilità quando le estremità delle linee sono colorate, e inoltre i colori indicano che si tratta di intersezioni confuse piuttosto che di veri e propri angoli.

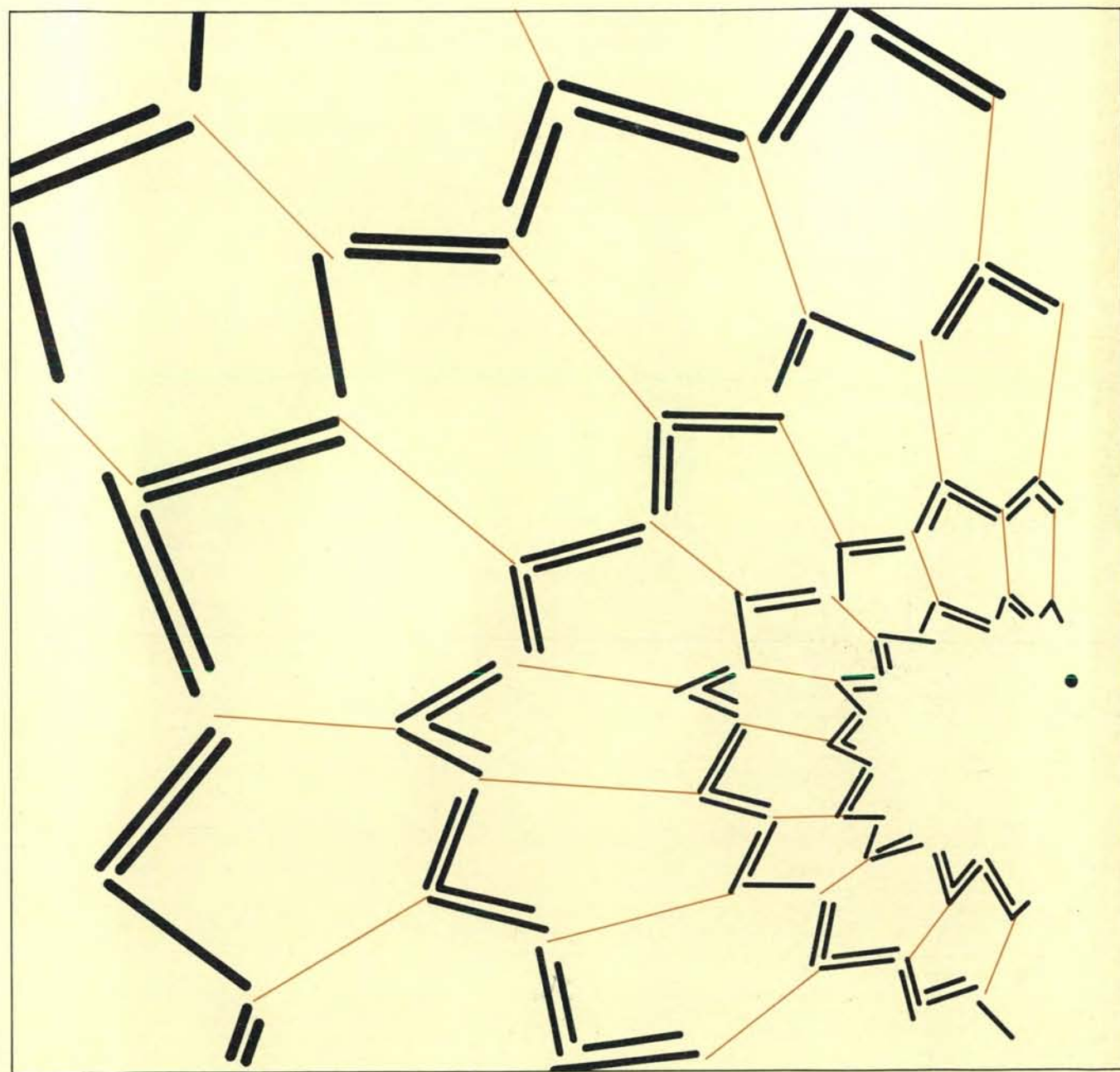
A questo riguardo è stato individuato un interessante effetto relativo alle dimensioni. Le linee, le loro estremità colorate le distanze che le separano venivano percepite con maggiore chiarezza quando il soggetto da me studiato fissava lo sguardo su una superficie distante sino a venti centimetri dai suoi occhi piuttosto che su una parete distante uno o due metri, sebbene nel primo caso le dimensioni delle linee apparissero minori. Questa maggiore acutezza visiva non è attribuibile a fattori ottici, per esempio a una migliore messa a fuoco da parte del cristallino, in quanto l'immagine è cerebrale e non è il risultato della filtrazione della luce attraverso l'occhio. Conseguentemente la migliore messa a fuoco deve essere causata da una modificazione dell'attività cerebrale, per esempio, la convergenza dei due occhi potrebbe implicare una variazione delle unità visive interessate in questo processo.

La riduzione delle dimensioni apparenti è facilmente spiegabile: quando gli occhi convergono per fissare un oggetto vicino si verifica una illusoria diminuzione delle dimensioni dell'immagine retinica, un effetto chiamato micropsia. Ciò che è strano nel caso delle fortificazioni è che sebbene le linee osservate durante un attacco di emicrania possano apparire piú piccole al soggetto, le loro dimensioni angolari medie (calcolate dallo sperimentatore misurando le linee riprodotte in un disegno o presentando al soggetto delle linee campione in base a cui eseguire un confronto) possono aumentare in corrispondenza della minore distanza di fissazione, simultaneamente all'aumento dell'eccentricità angolare dell'arco. Calcoli accurati indicano che questo effetto di inversione delle dimensioni produce un ingrandimento del 25 per cento quando la distanza di fissazione è ridotta da 120 a 20 centimetri circa. Poiché le variazioni delle dimensioni angolari di queste immagini di origine interna sono il contrario di quelle di immagini esterne, si presume che il movimento di convergenza degli occhi induca una modificazione delle vie visive a livello dell'alterazione corticale o a un livello intermedio fra l'organo di senso visivo e il punto dell'alterazione corticale.

Se le dentellature delle fortificazioni non sono dovute all'attività di rilevatori di angoli, qual è la ragione della loro forma? Perché l'arco non è costituito da una linea ininterrotta che rifletta l'espansione, presumibilmente lenta e continua, del disturbo corticale? La presenza delle dentellature conferma l'ipotesi che il sustrato neuronale della corteccia sia organizzato in elementi discontinui a livello dei singoli neuroni o a un livello superiore. In questo caso una linea continua attraverso la corteccia passerebbe da un elemento a quello successivo, e ogni

singolo elemento potrebbe essere rappresentato diversamente nel campo visivo. Questi elementi potrebbero essere costituiti da raggruppamenti di neuroni corticali, rispondenti a certe caratteristiche di attivamento, sensibili, per esempio, a linee aventi uno stesso orientamento in una data area del campo visivo. I neurofisiologi hanno raccolto dati a favore dell'esistenza di tali raggruppamenti, ma hanno incontrato delle difficoltà nel tentativo di localizzare, mediante tecniche di registrazione diretta, delle successioni di raggruppamenti che permettessero di determinarne l'organizzazione corticale.

Tutte le figure di fortificazione sono accomunate da due caratteristiche sorprendenti e significative. La prima viene individuata misurando l'angolo interno di due linee che formino una dentellatura in vari punti del campo visivo. L'angolo è quasi sempre acuto: è di circa 45 gradi in prossimità del centro del campo, di 70 gradi nell'area periferica e il suo valore medio è di circa 60 gradi. La seconda caratteristica è data dall'assenza di linee radiali perpendicolari al limite esterno delle fortificazioni. La prima caratteristica fa supporre che nella corteccia visiva dell'uomo il substrato neuronale che presiede alla percezione delle linee sia organizzato secondo una struttura a intreccio regolare per cui ogni linea ha, rispetto a quella vicina, una inclinazione di 60 gradi. Nella misura in cui tale intreccio è regolare all'interno di un settore del campo visivo, ogni linea dovrebbe avere solo tre possibili orientamenti, per cui lo spazio visivo assumerebbe una configurazione ad asterisco (*). La seconda caratteristica conferma tale ipotesi poiché solo una simile organizzazione spaziale della corteccia potrebbe spiegare la selettività di risposta per cui vengono escluse tutte le linee radiali.

Desidererei approfondire questo argomento. Normalmente viene percepito un solo arco dentellato, ma è possi-

Configurazione ad alveare risultante dalla rappresentazione simultanea di più archi collegati tra loro mediante linee approssimativamente radiali. Questa caratteristica struttura e l'ampiezza degli angoli interni, che si aggira intorno ai 60 gradi, suggeriscono una organizzazione neuronale esagonale. Ma per quale ragione non vengono percepite le linee radiali (*righe colorate*)?

bile rappresentare una successione di archi mantenendo la lunghezza delle linee e le dimensioni degli angoli conformi ai dati sperimentali. Se questi archi vengono uniti da linee radiali (*righe colorate*) appare una struttura simile a un alveare lievemente modificato. Ma le linee radiali sono esattamente quelle che non vengono mai percepite. Per quale ragione? La spiegazione risiede nella natura dei processi percettivi che rispondono essenzialmente a differenze locali. Per esempio, la luminosità di un quadrato non sarà data dall'intensità della luce in esso distribuita, ma dalla differenza di intensità percepita ai margini del quadrato stesso: un pezzo di carta grigia apparirà quindi chiaro o scuro a seconda dello sfondo su cui è collocato. In altre parole, il sistema visivo prende in considerazione solo i due lati del margine e completa la descrizione relativa alla rimanente area mediante un processo di estrapolazione o di deduzione.

Immaginiamo ora un ipotetico fronte d'onda di attività elettrica che avanzi attraverso la corteccia (*si veda la figura in basso*). Il gradiente elettrico associato al fronte d'onda è determinato dalla densità dei cerchi aventi segno positivo (+) e negativo (—); i cerchi rappresentano le singole unità, la cui attività viene sommata all'interno dei raggruppamenti, o elementi lineari, indicati da una linea di contorno colorata. Prendiamo in esame l'eventualità che questi elementi abbiano tre possibili orientamenti: perpendicolare, parallelo e obliquo rispetto al fronte d'onda.

Due elementi adiacenti, perpendicolari al fronte d'onda, avranno presumibilmente la stessa carica elettrica, per cui non potrà esservi una risposta basata sulla loro differenza e non verranno percepiti. Raggruppamenti paralleli al fronte d'onda, collocati sui due lati dello stesso, avranno una attività elettrica diversa, con cariche altamente positive o altamente negative, e saranno quindi ben visibili. Ma il caso di elementi lineari paralleli all'arco in espansione si verifica raramente. La spiegazione risiede nella natura della risposta neuronale al gradiente elettrico. I neuroni che costituiscono gli elementi lineari entrano in attività solo quando vi è uno squilibrio ionico, negativo o positivo, nell'elemento stesso, mentre non è determinante la polarità al gradiente. Per questa ragione quando due elementi paralleli si collocano esattamente ai lati del fronte d'onda, la loro attività è uguale e quindi non vi è la base per una risposta differenziale che li renda visibili. Due elementi paralleli diverrebbero visibili solo se fossero separati da un terzo elemento parallelo, attraversato e diviso in due dal fronte d'onda, poiché in questo caso la loro attività si differenzierebbe dall'inattività del terzo elemento. Tuttavia un elemento risulterebbe diviso in due solo per un tempo estremamente limitato, per cui solo raramente elementi paralleli potrebbero essere visibili, e qualora il gradiente fosse basso non lo sarebbero mai.

È il terzo tipo di raggruppamento, un elemento obliquo rispetto al fronte d'onda, che ha le maggiori probabilità di essere visto. In questo caso esistono due possibili elementi attivi, in corrispondenza del lato positivo e di quello negativo, che si differenziano chiaramente da quello neutrale a essi intermedio. Poiché il contrasto fra l'attività di questi due elementi obliqui è in larga misura indipendente dall'esatta posizione e dall'entità del gradiente elettrico, le linee che rappresentano la loro attività dovrebbero essere quelle osservate con maggiore frequenza. Queste sono le linee che costituiscono le tipiche dentellature delle fortificazioni.

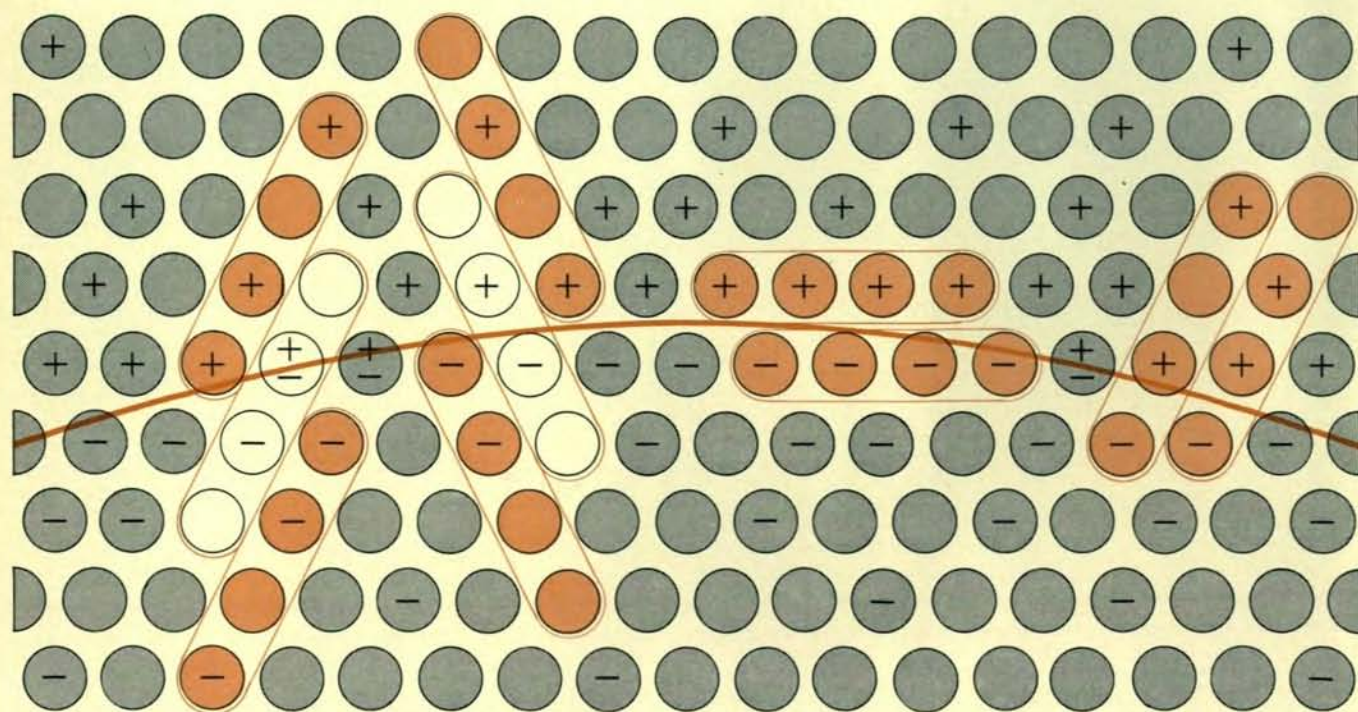



Illustrazione diagrammatica di un substrato neuronale interessato da un disturbo emicranico in cui si vede in quale modo l'attività elettrica dipenda esclusivamente dalla percezione di linee aventi un dato orientamento. La frequenza dei segni positivi e negativi rappresenta il gradiente elettrico associato all'espansione del fronte d'onda (*arco colorato*) del disturbo emicranico. I cerchi rappresentano neuroni cerebrali. Quattro neuroni allineati costituiscono un elemento lineare. I due elementi (*in colore*) a destra sono perpendicolari al fronte d'onda. In questa posizione l'attività globale dei due elementi è identica, per cui non è possibile una risposta differenziale da parte della corteccia e i due raggruppamenti non risultano visibili. Elementi paralleli al fronte d'onda possono essere visti in alcuni casi, ma solo se il gradiente attraversa un elemento e non passa attraverso i due come nella figura. Gli elementi obliqui (*a sinistra*) al fronte d'onda sono i piú visibili: gli elementi attivi (*in colore*) al di sopra e al di sotto del fronte d'onda forniscono delle risposte differenziali rispetto agli elementi (*in bianco*) aventi una attività equivalente allo zero. Questi elementi danno luogo alla visione degli archi dentellati delle figure predecenti.

Le torri di raffreddamento

Il calore residuo posseduto dall'acqua che esce dalle turbine delle grandi centrali termoelettriche viene dissipato in torri dove l'acqua viene atomizzata, raffreddata in corrente d'aria e rimessa in circolo

di Riley D. Woodson

Una moderna centrale elettrica con motori primi costituiti da turbine a vapore ha un rendimento termico del 40 per cento circa; ciò vuol dire che, di tutta l'energia termica fornita al sistema con la combustione, solo il 40 per cento viene trasformato dalla centrale in energia elettrica, mentre la maggior parte del calore inutilizzato deve essere eliminata. Nella maggioranza di queste installazioni il calore è asportato con acqua di raffreddamento prelevata da un corso d'acqua o da un lago o anche dal mare. L'acqua viene fatta passare attraverso l'impianto e dopo essersi riscaldata viene restituita alla fonte di approvvigionamento. Questo tipo di raffreddamento è però meno accettabile da quando sono cominciati a sorgere problemi relativi agli approvvigionamenti d'acqua di raffreddamento e agli effetti biologici del riscaldamento di masse naturali di acqua.

Quali alternative esistono per il raffreddamento delle centrali elettriche e degli altri impianti industriali? L'aria è un perfetto fluido refrigerante e difatti alcuni impianti sono raffreddati con sistemi a « secco ». Tuttavia, siccome l'aria è un gas, per raffreddare efficacemente un grande impianto occorre spostarne volumi enormi e costruire impianti con complesse superfici di contatto per favorire lo scambio di calore. Una alternativa piú pratica è la torre di raffreddamento a « liquido » dove aria e acqua sono ambedue usate come refrigeranti. In queste torri l'acqua di raffreddamento, dopo aver circolato nell'impianto, viene fatta cadere in una controcorrente d'aria e cede il suo calore soprattutto per evaporazione. L'acqua rimanente si raccoglie al fondo della torre ed è recuperabile per un nuovo ciclo di raffreddamento.

Sebbene il principio sia semplice, la torre in se stessa ha di solito una struttura abbastanza complessa. Una ragione di tale complessità è la grande quantità di calore che deve essere asportata solitamente dagli impianti industriali; un'altra è la necessità di far passare l'acqua attraverso la torre sotto forma di piccole goccioline in modo da ottenere il massimo contatto fra l'acqua e l'aria. Per queste ragioni una torre tipo, simile a quelle attualmente in funzione, compresi i ventilatori di grande capacità per assicurare il flusso dell'aria, ha una larghezza di circa 17 metri alla base e di 23 metri alla sommità con un'altezza di circa 100 metri. Essa è formata da parecchie celle di raffreddamento ciascuna equipaggiata con un ventilatore di tiraggio, il cui diametro può raggiungere 8,5 metri, azionato da un motore della potenza di 200 CV. Le torri a tiraggio naturale simili a ciminiere, piú comuni in Europa che negli Stati Uniti, possono avere invece un diametro di 90 metri o piú alla base e un'altezza fino a 150 metri. Il costo di una torre dimensionata per una centrale elettrica della potenza installata di 800 000 chilowatt alimentata con combustibile fossile, può essere stimato, negli USA, circa 1,7 milioni di dollari nel caso di tiraggio meccanico e circa 4,2 milioni di dollari nel caso del tiraggio naturale. Il costo di esercizio di una torre a tiraggio naturale è però inferiore perché questa struttura funziona come un camino e non ha bisogno di energia elettrica per azionare i ventilatori.

Le torri di raffreddamento di dimensioni assai inferiori, come quelle usate negli impianti di condizionamento d'aria centralizzati, sono abitualmente costruite in serie da ditte specializzate, scelte su un catalogo, acquistate e installate come un componente dell'edificio. Le torri di raffreddamento di grandi dimensioni che si trovano nelle centrali elettriche, negli impianti petrolchimici e in altre importanti attrezzature industriali sono invece progettate e costruite sul posto una per una.

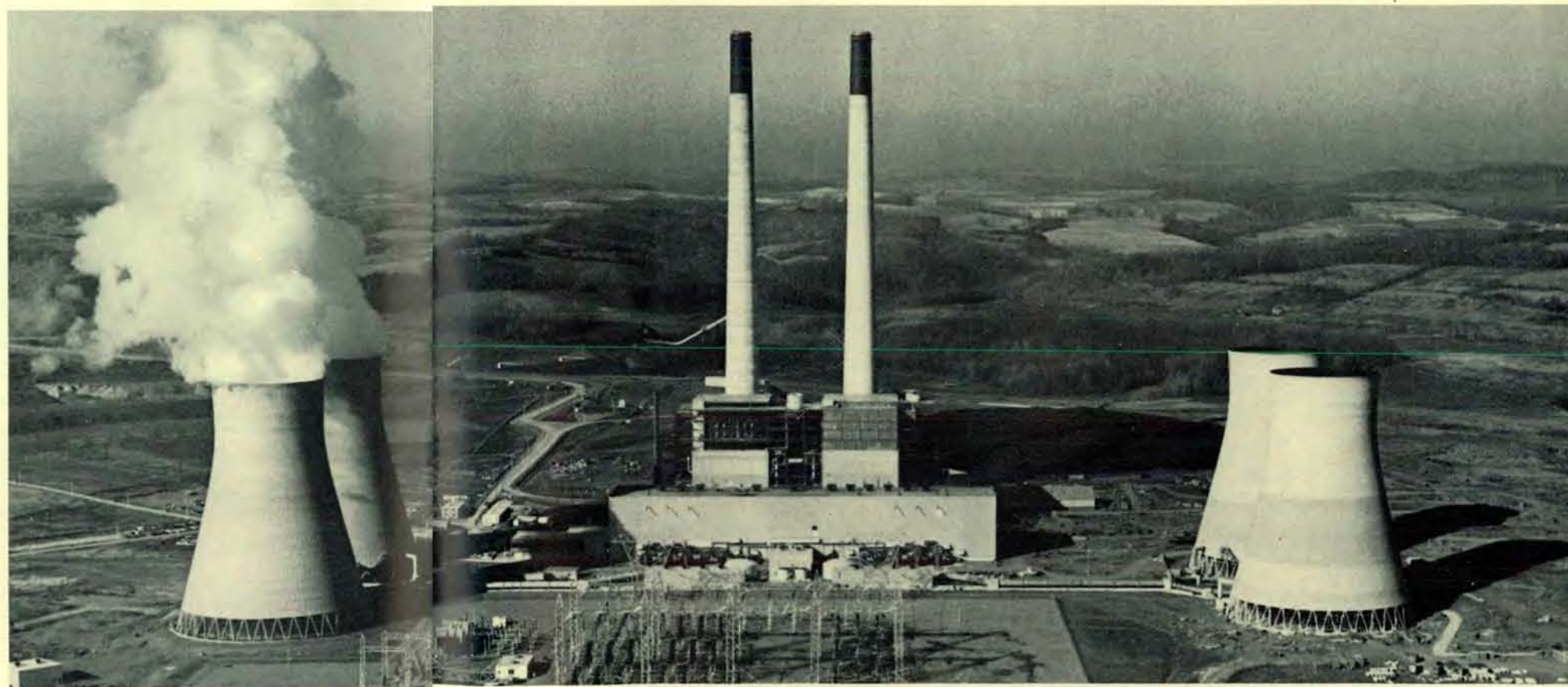
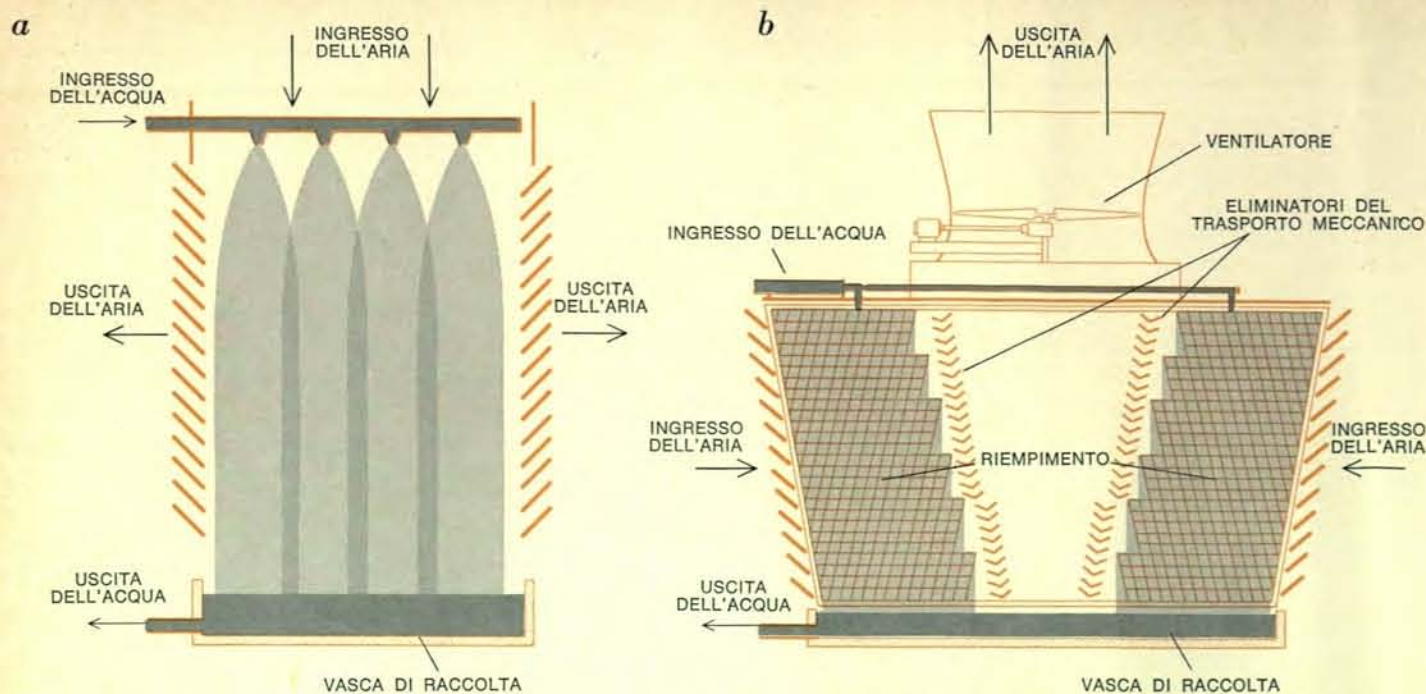
Il progettista di una grande torre di raffreddamento, deve tener presenti numerosi fattori fisici: deve conoscere, per esempio, la temperatura dell'acqua all'ingresso e all'uscita della torre. Questa differenza determina infatti il campo di raffreddamento della torre ed è di solito compresa fra 5 e 22 gradi centigradi.

Un altro fattore da prendere in considerazione è la temperatura media estiva della zona nella quale sorgerà la torre, poiché il problema del raffreddamento diviene piú complesso con l'aumentare della temperatura ambiente. Per questo calcolo si usa rilevare la temperatura atmosferica misurata « a bulbo umido » anziché « a bulbo asciutto ». La temperatura a bulbo umido corrisponde infatti alla piú bassa temperatura dell'acqua che può essere raggiunta per evaporazione nell'ambiente circostante. Essa viene misurata facendo girare rapidamente un termometro col bulbo fasciato da un tessuto bagnato e rappresenta il limite teorico di raffreddamento ottenibile in una torre. Per raggiungere tale limite sarebbe necessaria una torre con un rendimento termico del 100 per cento che però non è realizzabile in pratica.

La differenza fra il raffreddamento limite teorico e quello effettivo ottenuto nella torre è chiamata « approssimazione al bulbo umido » della torre. Raramente questa approssimazione, rispetto al limite teorico, è inferiore a tre gradi centigradi e piú spesso è compresa fra quattro e 8,5 gradi centigradi. Le temperature a bulbo umido per le quali sono progettate le torri di raffreddamento variano fra 15 e 28 gradi centigradi. Il criterio abituale è che la temperatura a bulbo umido di progetto della torre, non venga superata per un periodo di tempo maggiore del 5 per cento del tempo complessivo di funzionamento della torre durante l'estate.

Poiché il raffreddamento avviene principalmente per evaporazione, una parte dell'acqua che circola nel sistema viene perduta sotto forma di vapore. La regola empirica approssimativa è che per ogni 5,5 gradi centigradi di raffreddamento, si ha una perdita per evaporazione dell'1 per cento. Ci sono però altre due cause di perdite d'acqua: la prima è dovuta al trasporto meccanico, cioè la perdita che si ha semplicemente per il trasporto all'esterno di piccole goccioline da parte dell'aria che abbandona la torre. Generalmente i fabbricanti di torri di raffreddamento garantiscono una perdita per trasporto meccanico non superiore allo 0,2 per cento dell'acqua in circolazione. La seconda causa di perdita deriva dalla necessità di prelevare parte dell'acqua per eliminare con essa le sostanze disciolte che potrebbero formare incrostazioni e ostacolare il funzionamento dell'impianto. Questo procedimento è chiamato nell'industria « blowdown ». Di norma esso determina una perdita dello 0,3 per cento per ogni 5,5 gradi centigradi di raffreddamento.

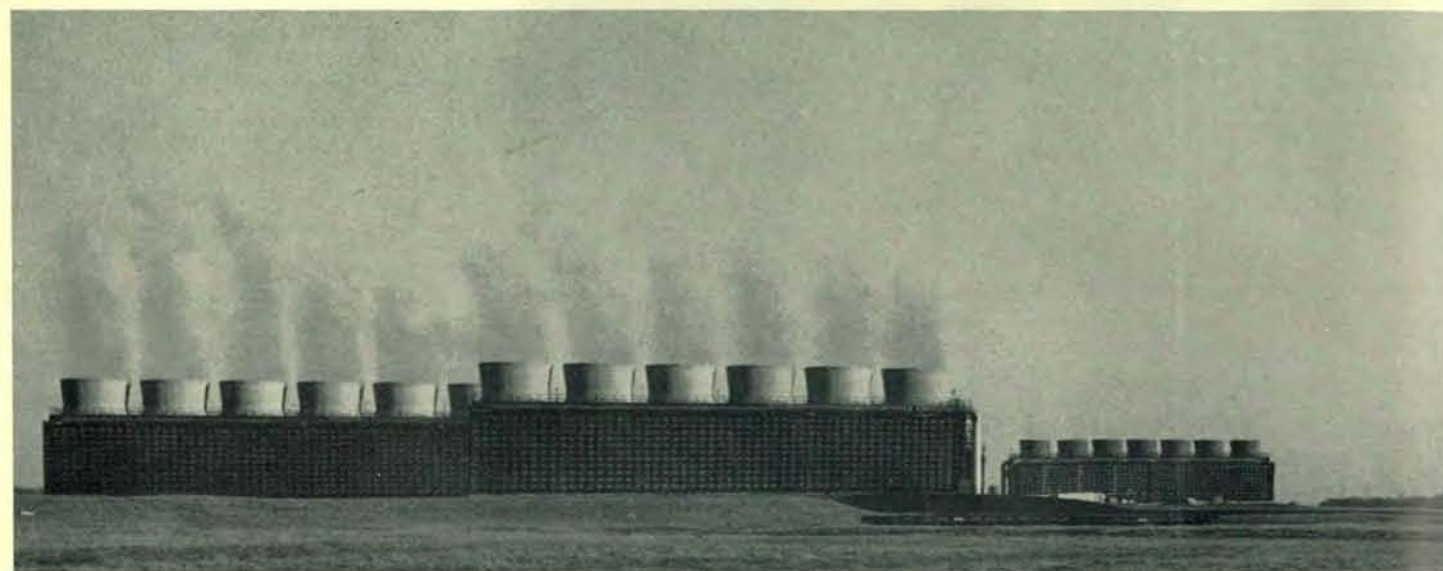
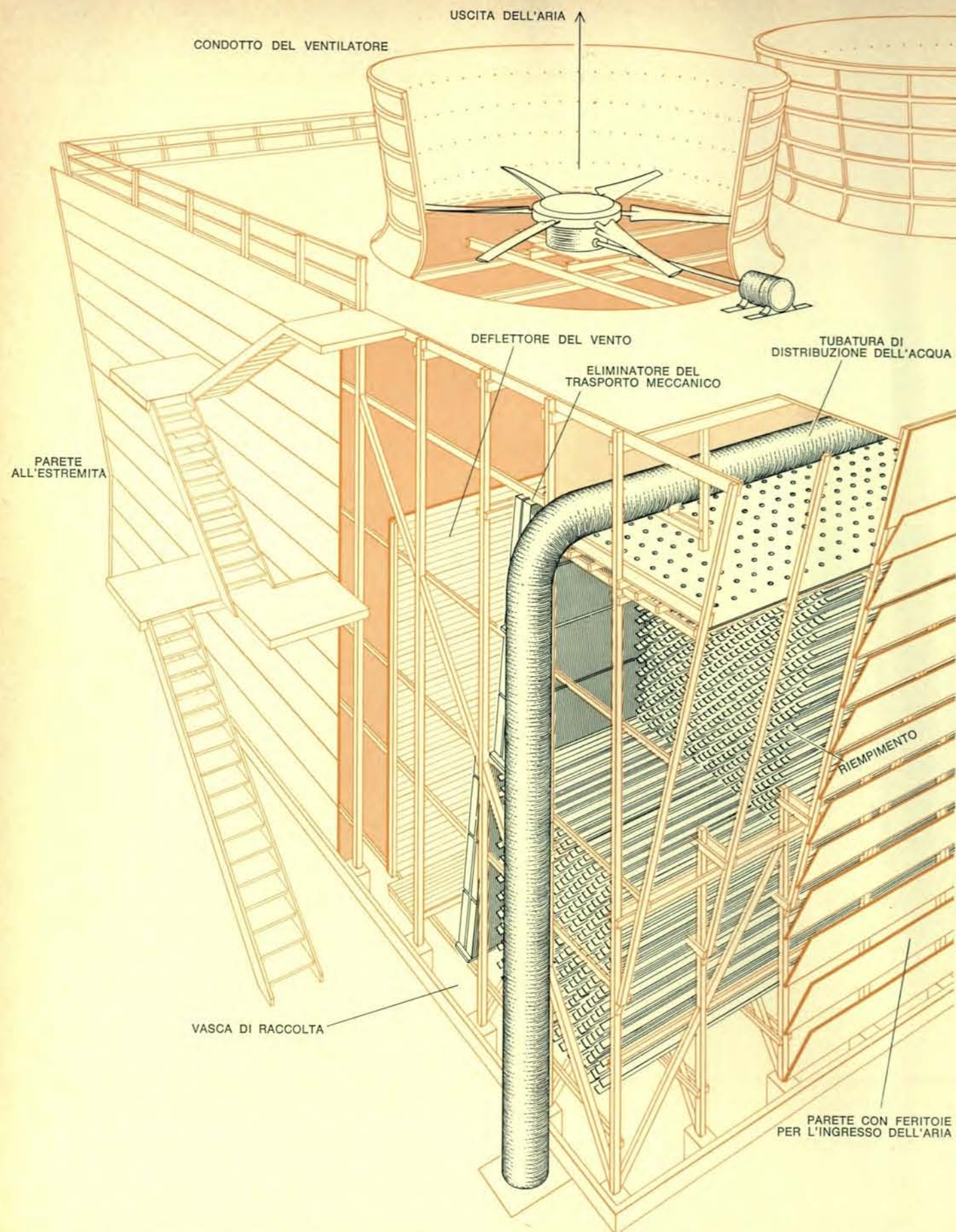
La somma delle perdite citate deve essere compensata con l'immissione di nuova acqua nell'impianto. Sebbene le perdite costituiscano solo un'esigua percentuale dell'acqua in circolo, la quantità di liquido occorrente per la « compensazione » di una grande torre di raffreddamento è notevole. In una moderna centrale elettrica della potenza di 680 000 chilowatt la quantità di acqua in circolo nelle torri, in condizioni medie estive, sarebbe di circa 1300 milioni di litri al giorno e la quantità richiesta per la compensazione sarebbe di circa 25 milioni di litri giornalieri.

Le prime torri industriali di raffreddamento che sono state costruite all'inizio del secolo facevano assegnamento sui movimenti naturali dell'aria. Siccome il vento è raramente abbastanza forte da provocare un intenso movimento d'aria attraverso una struttura di grandi dimensioni, una torre atmosferica doveva essere lunga, stretta e alta e con il fianco perpendicolare alla direzione del vento dominante nella

Quattro torri di raffreddamento servono la centrale elettrica a vapore di Keystone nella Pennsylvania occidentale. Ogni coppia di torri serve uno dei due gruppi di generatori della centrale che erogano 820 000 chilowatt. Le torri hanno un'altezza di 100 metri, un diametro di 75 metri alla base e di 43 metri alla sommità. Sono torri a tiraggio naturale con la tipica forma iperbolica; la maggior parte della loro altezza serve a indurre un forte tiraggio d'aria all'interno, dal basso verso l'alto, mentre l'acqua calda proveniente dall'impianto cade in controcorrente all'aria e viene raccolta in una vasca al fondo della torre. Dalle torri a sinistra escono nuvole di vapore; al momento in cui è stata scattata la fotografia le due torri a destra non erano in funzione. L'impianto è di proprietà comune di sette società elettriche.

In questa illustrazione sono rappresentati schematicamente i vari tipi di torri. Nella torre atmosferica (*a*), che è stata uno dei primi tipi di torre di raffreddamento, si faceva assegnamento sull'effetto del vento e su quello aspirante degli ugelli spruzzatori. La torre a tiraggio meccanico a correnti incrociate (*b*), che è attualmente il tipo piú diffuso, ha un ventilatore alla sommità per aspirare l'aria attraverso le feritoie; l'aria attraversa il percorso dell'acqua che scende ed esce dal condotto del ventilatore. Il materiale di riempimento suddivide l'acqua in piccole goccioline e gli eliminatori del trasporto meccanico rallentano il movimento dell'acqua trascinata dall'aria all'esterno del condotto del ventilatore. Le torri raffigurate nella fotografia della copertina di questo numero e in basso in queste due pagine, sono di questo tipo. La torre a tiraggio meccanico a controcorrente (*c*) è analoga alla precedente eccetto che l'aria si muove verticalmente verso l'alto in controcorrente con l'acqua che cade. La torre iperbolica a tiraggio naturale (*d*) non ha ventilatore; il tiraggio è assicurato dall'altezza della struttura e dalla differenza di densità esistente fra l'aria calda e umida all'interno della torre e l'aria esterna piú fredda e piú densa.

zona. Queste torri non comportavano spese di equipaggiamento meccanico, ma essendo molto alte era necessario pompare l'acqua da raffreddare fino alla sommità e i costi di pompaggio erano abbastanza elevati. Per di piú, il raffreddamento ottenibile con una torre atmosferica per una determinata quantità d'acqua, era casuale perché dipendeva non solo dalla temperatura ambiente, ma anche dalla velocità e dalla direzione del vento.

L'equivalente moderno della torre atmosferica è la torre « iperbolica » che funziona sul principio del tiraggio naturale. Il termine « iperbolico » si riferisce al fatto che la torre ha la caratteristica forma di una iperbole (*si veda l'illustrazione nelle due pagine precedenti*). In una torre di questo tipo l'aria si muove verso l'alto per l'effetto « camino » prodotto dalla differenza di densità fra l'aria calda e umida all'interno della torre e l'aria esterna piú fredda e piú densa. Le torri iperboliche sono piú adatte all'impiego nelle regioni a elevata umidità, come l'Europa occidentale e le regioni orientali e nord-occidentali degli Stati Uniti. Esse sono anche indicate per installazioni in zone abitate perché l'altezza a cui avviene lo scarico riduce la possibilità di formazione di nebbia in prossimità del suolo.

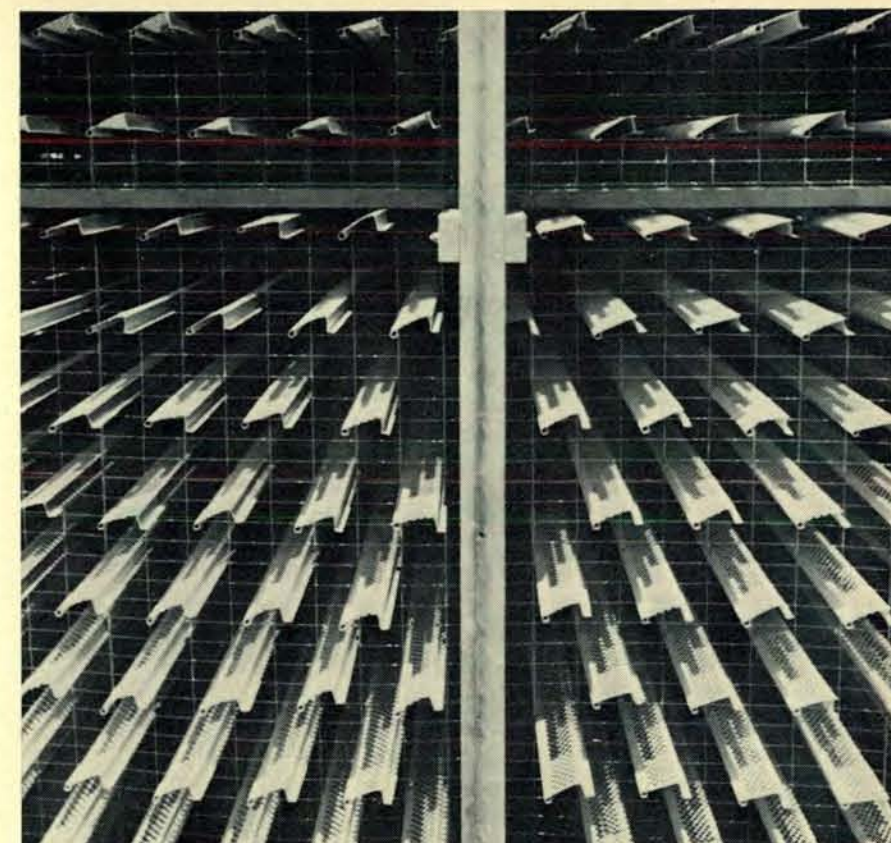
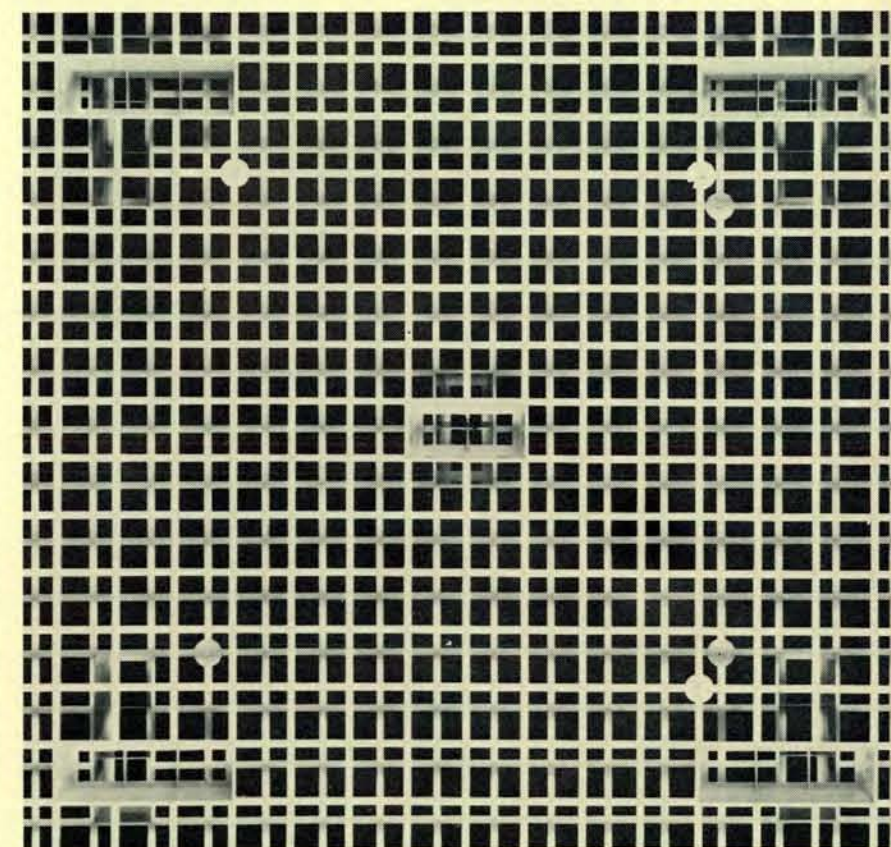
Motivi sia economici che climatici spiegano la maggiore diffusione delle torri iperboliche in Europa. Di solito una torre iperbolica è costituita da un sottile involucro in cemento armato la cui costruzione richiede molta mano d'opera che in Europa costa meno che negli Stati Uniti. D'altra parte in Europa è piú alto il costo dell'energia elettrica e perciò è conveniente poter far funzionare una torre di raffreddamento senza ventilatori. Negli ultimi anni però sono cambiate negli Stati Uniti alcune condizioni cosicché vi si costruisce attualmente un maggior numero di torri iperboliche. I motivi comprendono il perfezionamento dei materiali e delle tecniche di costruzione, l'aumento del costo dei terreni (una torre iperbolica occupa una superficie minore degli altri tipi) e l'efficienza della torre iperbolica nel disperdere grandi quantità di vapore acqueo.

Circa 40 anni fa entrarono in uso le prime torri a tiraggio meccanico che impiegavano ventilatori per imporre o indurre il movimento dell'aria. Nella torre a tiraggio forzato il ventilatore è situato nella parte inferiore e spinge l'aria verso l'alto attraverso la torre; nella torre a tiraggio indotto il ventilatore si trova alla sommità e solleva l'aria. Il regime a tiraggio forzato crea alcuni problemi per le torri di grandi dimensioni, il piú importante dei quali è la ricircolazione: il vapore che abbandona la torre a bassa velocità tende infatti a rientrare nella torre stessa.

Torri a correnti incrociate con tiraggio meccanico che servono una centrale della potenza installata di 640 000 chilowatt della Public Service Company dell'Oklahoma. Tutto l'impianto è servito da due torri a sei celle (*in primo piano a sinistra*) e da due torri a sette celle (*sullo sfondo a sinistra*). La centrale elettrica è la costruzione a destra. In funzionamento normale il flusso d'acqua attraverso l'intero complesso delle quattro torri di raffreddamento è di circa 2000 milioni di litri al giorno.

In questa figura sono mostrati i particolari costruttivi di una cella di una torre a correnti incrociate a tiraggio meccanico. Di solito gran parte della torre è realizzata in legno quantunque si incominci a usare la plastica in sostituzione delle caratteristiche assi che formano il riempimento. In questo disegno la grande tubatura vicino alla sommità, costruita in plastica e fibra di vetro, distribuisce l'acqua calda, che attraversa la torre e cade nel bacino di raccolta. La torre ha delle feritoie su due lati per far entrare l'aria di raffreddamento che fluisce attraverso l'acqua che cade. Le due pareti alle estremità sono invece chiuse.

Di conseguenza aumenta la temperatura a bulbo umido dell'aria entrante e il rendimento della torre peggiora. Un altro problema è la difficoltà di ottenere, in grandi unità a tiraggio forzato, una distribuzione uniforme dell'aria in tutta la torre come è necessario per un buon funzionamento. Per queste ragioni le moderne torri industriali a tiraggio meccanico funzionano sul principio del tiraggio indotto.

Il progettista, tenendo conto delle esigenze particolari di una torre a tiraggio meccanico, prevederà per l'aria un movimento in controcorrente o a correnti incrociate con l'acqua che cade. In una torre a controcorrente, l'acqua si muove verso il basso e l'aria verso l'alto mentre in una torre a correnti incrociate l'acqua si muove perpendicolarmente verso il basso e l'aria orizzontalmente. Per molte ragioni il sistema delle correnti incrociate è assai piú usato di quello della controcorrente.

Un chiaro vantaggio del sistema a correnti incrociate è la minore perdita di tiraggio. In una torre a controcorrente l'aria si sposta per l'intero percorso, dal fondo alla sommità, sempre in senso contrario all'acqua e oppone cosí la massima resistenza, dando luogo a una notevole perdita di tiraggio. In una torre a correnti incrociate l'aria attraversa invece il percorso dell'acqua e si sposta verticalmente per una distanza piú breve con una conseguente minore perdita di tiraggio.

Un altro fattore in favore delle torri a correnti incrociate deriva dal fatto che il raffreddamento fornito da una torre aumenta con lo sviluppo dell'altezza del materiale di « riempimento », che all'interno della torre disperde l'acqua in piccole goccioline. La torre a correnti incrociate trae un particolare vantaggio dall'aumento di altezza poiché la distanza percorsa dall'aria è indipendente dall'altezza del riempimento. Quindi la distanza percorsa dall'aria e l'altezza del riempimento (ovvero la distanza percorsa dall'acqua attraverso l'aria) possono essere scelte in modo da minimizzare le perdite di tiraggio. In una torre a controcorrente la distanza percorsa dall'aria è direttamente proporzionale all'altezza del riempimento cosicché tale altezza può essere aumentata solo a condizione di aumentare la potenza del ventilatore per compensare la maggiore perdita di tiraggio attraverso il riempimento. La torre a correnti incrociate dà migliori prestazioni di quella a controcorrente quando occorre trattare grandi quantità d'acqua con un esteso campo di raffreddamento e con piccole approssima-

Nelle grandi torri di raffreddamento di solito è installato un riempimento a « spruzzo » realizzato con delle barre disposte orizzontalmente a strati fino a una notevole profondità; queste interrompono la caduta dell'acqua disperdendola in piccole goccioline. Le barre sono di solito in legno o, come in questo caso, in plastica perforata.

Nelle torri piú piccole qualche volta è usato il riempimento a film. Questo è realizzato secondo forme geometriche che obbligano l'acqua a ripartirsi su ampie superfici.

zioni alle temperature a bulbo umido.

Nelle torri di raffreddamento a secco, nelle quali il refrigerante è solo aria, l'acqua riscaldata dal calore asportato dall'impianto viene fatta circolare in un sistema chiuso di tubi esposti all'aria. Una torre del genere, che funziona senza perdita d'acqua per evaporazione e per trasporto, è conveniente nelle zone in cui vi è scarsità di approvvigionamento idrico. Tuttavia le torri a secco sono molto costose, perciò sono state costruite solo in poche centrali elettriche in cui si presentano particolari necessità. La maggior parte delle unità a secco si trovano negli Stati Uniti e sono installate in centrali elettriche di dimensioni relativamente esigue (250 000 chilowatt o meno).

In una torre a liquido, l'acqua calda che entra dalla sommità della torre per raffreddarsi, viene distribuita uniformemente e fatta cadere attraverso la torre. Nella maggior parte delle torri a correnti incrociate l'acqua viene semplicemente riversata su dei diaframmi che la disperdono in minute goccioline. Nelle torri a controcorrente è invece difficile ottenere una distribuzione uniforme dell'acqua per gravità: essa viene quindi portata a pressione e spruzzata verso il basso da appositi ugelli.

Il sistema di dispersione funziona nell'atmosfera ossidante ed estremamente corrosiva della torre. In conseguenza i materiali di cui esso è costituito devono essere scelti con cura: si impiegano a questo scopo tubature in legno di sequoia, in ghisa, in acciaio zincato e piú recentemente in plastica per tenere bassi i costi di manutenzione.

Uscendo dal sistema di distribuzione, l'acqua cade sopra il primo dei numerosi strati di materiale di riempimento. Il riempimento, che occupa quasi tutto l'interno della torre, ha la funzione di accelerare la dispersione del calore aumentando la superficie e la durata del contatto fra l'acqua e l'aria. Esso assolve questo compito favorendo la formazione di goccioline e di sottili strati di acqua, aumentando cosí la superficie bagnata in contatto con l'aria. Contemporaneamente dovrebbe offrire una bassa resistenza alla corrente d'aria e mantenere uniforme la distribuzione dell'acqua e dell'aria.

Nella maggior parte delle torri industriali il riempimento è del tipo « a spruzzo »: è formato cioè da piccole barre o tavolati disposti orizzontalmente (*si veda l'illustrazione nella pagina precedente in alto*). L'acqua gocciola verso il basso da un ordine di barre a quello successivo. Si realizza cosí una buona esposizione delle superfici liquide al passaggio dell'aria perché le gocce d'acqua, rompendosi nella caduta, sono costantemente suddivise in piccole goccioline e in sottili film.

Il legno è il materiale di riempimento abitualmente usato anche se negli ultimi anni sono state prodotte a questo scopo strisce perforate di plastica. La sequoia è stata in voga per molto tempo; ultimamente è aumentato l'impiego dell'abete in conseguenza dei perfezionamenti raggiunti nel campo delle sostanze protettive del legno. Qualche volta si trovano barre a spruzzo in metallo o in ceramica, ma dato il loro alto costo vengono utilizzate solo per applicazioni speciali.

In una torre con riempimento a spruzzo è importante che le barre siano mantenute orizzontalmente: se si inclinano l'acqua tenderà a scorrere lungo di esse in piccoli rivoli diminuendo la capacità di raffreddamento della torre. È anche importante che la torre sia mantenuta a livello, altrimenti l'acqua scorrerà verso l'estremità piú bassa delle barre a spruzzo e si avrà ancora il fenomeno dei rivoli. Un altro tipo di riempimento che sta incontrando un favore crescente per le torri piú piccole, è chiamato riempimento a film perché tende a suddividere l'acqua che cade in sottili lamine che scorrono su di una grande superficie complessiva. Il riempimento a film è realizzato in plastica, metallo o amianto e in forme complesse come quella a nido d'ape. È piú costoso del riempimento a spruzzo, ma a parità di volume occupato fornisce un raffreddamento piú efficace. D'altra parte il riempimento a film è piú sensibile del riempimento a spruzzo alle irregolarità del flusso dell'aria e della distribuzione dell'acqua, cosicché occorre progettare la torre in modo che tali irregolarità sicuramente non si verifichino. Il riempimento deve essere disposto uniformemente e ben sostenuto.

Alla fine del passaggio attraverso la torre, l'acqua raffreddata cade in una vasca di raccolta al fondo della torre: da qui viene pompata verso il punto nel quale riceve il calore – per esempio un condensatore di vapore in una centrale elettrica – e inizia un altro ciclo.

In una torre a tiraggio meccanico, oltre al ventilatore e al suo motore (che devono entrambi poter funzionare a lungo e in condizioni severe) vi sono altri componenti meccanici che hanno un ruolo importante nella circolazione dell'aria attraverso la torre. Il caratteristico condotto svasato che circonda il ventilatore di ogni cella della torre assolve a diverse funzioni. Opera come custodia del ventilatore e come convogliatore del vapore d'acqua e dell'aria all'esterno della torre.

Due immagini di un eliminatore del trasporto meccanico d'acqua visto di profilo (*a sinistra*) e di fronte (*a destra*). Questa configurazione costringe l'aria a cambiare bruscamente direzione; la forza centrifuga che ne risulta separa le gocce d'acqua.

SISTEMA DI RAFFREDDAMENTO	CONDENSATORE E ACCESSORI		TORRI DI RAFFREDDAMENTO E VASCA		POMPE E TUBAZIONI		SISTEMA DI ALIMENTAZIONE		LAGO DI RAFFREDDAMENTO		INVESTIMENTO TOTALE	
OCEANO	1,6	2,4	—	—	3,3	4,8	—	—	—	—	4,9	7,2
FIUME	1,7	2,6	—	—	3,3	4,8	—	—	—	—	5	7,4
LAGO	1,5	2,3	—	—	2,7	3,9	—	—	2,6	3,4	6,8	9,6
TORRE A LIQUIDO A TIRAGGIO MECCANICO	1,9	2,8	1,7	2,6	1,6	2,4	1,2	1,6	—	—	6,4	9,4
TORRE A LIQUIDO A TIRAGGIO NATURALE	1,9	2,8	4,2	7,1	1,7	2,5	1,2	1,6	—	—	9	14
TORRE A SECCO A TIRAGGIO MECCANICO	1,1	1,7	12,2	19,3	2,1	3,4	—	—	—	—	15,4	24,4
TORRE A SECCO A TIRAGGIO NATURALE	1,1	1,7	28	45	2,1	3,4	—	—	—	—	31,2	50,1

Confronto fra i costi dei diversi sistemi di raffreddamento per una centrale della potenza di 800 000 chilowatt che brucia combustibile fossile (*in nero*) e per una centrale alimentata con combustibile nucleare (*in colore*). Le cifre sono in milioni di dollari. I prezzi sono riferiti a quelli del 1970. Nelle torri a secco l'acqua calda della turbina circola in tubature esposte all'aria.

Le feritoie ai lati della torre hanno l'evidente funzione di far entrare aria a sufficienza e quella meno evidente di impedire la perdita di acqua. Le feritoie devono fare entrare l'aria in modo che venga distribuita uniformemente con una minima caduta di pressione. Per evitare la perdita di acqua esse devono essere progettate con larghezza, spaziatura e inclinazione di giusto valore. Nelle torri a correnti incrociate che funzionano in periodi invernali, le feritoie sono disposte in modo da risultare inclinate all'interno sotto il riempimento. Se il ventilatore è in funzione, l'acqua che cade lava le feritoie riducendo cosí la formazione di ghiaccio. Se il ventilatore non è in funzione, le feritoie vengono bagnate con acqua calda e il ghiaccio normalmente non si forma.

Il problema del trasporto meccanico – la perdita di acqua trascinata dall'aria che abbandona la torre – è attenuato da appositi « eliminatori » installati lungo il condotto percorso dall'aria verso il ventilatore. Essi sono costituiti da percorsi geometricamente complessi che obbligano l'aria ascendente a cambiare bruscamente direzione. La forza centrifuga conseguente al cambiamento di direzione separa dall'aria le gocce di acqua che si depositano sulla superficie dell'eliminatore dove si raccolgono per rifluire poi all'interno della torre. Una funzione secondaria dell'eliminatore è quella di rendere uniforme il flusso dell'aria attraverso il riempimento. L'eliminatore offre una resistenza al flusso determinando con ciò una pressione uniforme nello spazio fra l'eliminatore e il ventilatore. Questo livellamento della pressione tende ad assicurare un flusso uniforme di aria attraverso il riempimento.

Un eliminatore efficiente deve diminuire il trasporto di una frazione accettabile senza opporre eccessiva resistenza all'aria. Una resistenza troppo elevata richiederebbe infatti una maggiore potenza per azionare il ventilatore. L'eliminatore deve anche poter raccogliere l'acqua trasportata e farla ricadere nella vasca di recupero senza reimmetterla nella corrente d'aria che esce dalla torre. Infine l'eliminatore funziona in un ambiente corrosivo, perciò deve essere costruito in materiali come legno trattato, acciaio zincato o inossidabile, plastica e amianto.

Una torre di raffreddamento ha bisogno di una costruzione solida per supportare tutti gli elementi strutturali, resistere senza deteriorarsi al movimento dell'acqua e dell'aria e assicurare sufficiente rigidità contro la forza del vento. Il progetto di un telaio deve essere elaborato con cura tenendo conto non solo dei fattori tecnici, ma anche di quelli termici, aerodinamici ed economici. I telai delle torri sono generalmente realizzati in legno e preferibilmente in legno di sequoia a causa della sua naturale resistenza al deterioramento; in questi ultimi anni è stato usato ampiamente anche il legno di abete trattato. Qualche volta il telaio viene costruito in acciaio inossidabile.

Nel funzionamento di una torre di raffreddamento a liquido è necessario porre molta attenzione alle caratteristiche dell'acqua; per questo occorre controllare il pH, effettuare una clorazione intermittente per distruggere i microrganismi ed eliminare le sostanze corrosive. I problemi connessi con lo scarico dell'acqua di blowdown in una massa di acqua naturale possono essere risolti con un trattamento di depurazione e, in alcuni casi, usando quest'acqua per altri processi dell'impianto.

Un esempio di impianto con una grande quantità di calore da asportare è una centrale elettrica a vapore della potenza di 800 000 chilowatt. Se l'impianto è di tipo moderno alimentato con combustibile fossile, la quantità di calore trasferita al condensatore dal vapore di scarico della turbina è circa il 50 per cento del calore fornito alla caldaia. Ciò equivale a circa 1,33 chilowatt di calore da dissipare per ogni chilowatt di potenza generata. In un impianto di dimensioni analoghe alimentato con combustibile nucleare, al con-

densatore viene trasferito circa il 66 per cento del calore fornito alla caldaia; ciò equivale a circa due chilowatt di calore da dissipare per ogni chilowatt di produzione netta.

Vi sono cinque diverse possibili alternative per raffreddare il condensatore di vapore: il sistema di raffreddamento dell'acqua a ciclo aperto o uno qualsiasi dei quattro tipi principali di torri di raffreddamento: a liquido (con tiraggio meccanico o con tiraggio naturale) o a secco (con tiraggio meccanico o con tiraggio naturale). Per una centrale con una potenza di 800 000 chilowatt, l'investimento complessivo per il sistema di raffreddamento è compreso fra 4,9 milioni di dollari, per un impianto a combustibile fossile con un sistema a circuito aperto che impiega acqua marina, e 50,1 milioni di dollari per un impianto nucleare con torre a secco a tiraggio naturale (*si veda l'illustrazione nella pagina precedente*). Queste cifre, che comprendono il costo del condensatore e dei relativi accessori, le pompe, le tubazioni e l'eventuale torre di raffreddamento, sono relative ai prezzi del 1970 e includono una spesa del 16 per cento del totale per spese generali dirette. In genere, per un determinato tipo di sistema di raffreddamento, i costi principali di una centrale nucleare sono approssimativamente del 50 per cento superiori a quelli di una centrale alimentata a combustibile fossile. Le torri a tiraggio naturale sono piú costose di quelle a tiraggio meccanico e le torri a secco piú di quelle a liquido. Siccome i costi d'investimento sono in aumento, l'influsso degli oneri fissi farà aumentare la differenza di spesa fra le torri a tiraggio naturale e quelle a secco.

Paragonando i costi parziali di produzione, che comprendono il capitale e il combustibile, ma non altre voci come il lavoro e la manutenzione, si trova che non c'è molta differenza fra il raffreddamento a ciclo aperto e quello a torre a liquido. Per una torre di raffreddamento a liquido i costi parziali di produzione sarebbero dal 3 al 10 per cento superiori il che significa un costo supplementare di 0,1-0,2 millesimi di dollaro per ogni chilowatt-ora. Una maggiore differenza si ha nel confronto dei costi parziali di produzione tra il sistema a ciclo aperto e quello a torre di raffreddamento a secco. In questo caso i costi parziali di produzione aumenterebbero del 30-75 per cento con un corrispondente costo aggiuntivo di 1-1,5 millesimi di dollaro per ogni chilowatt-ora.

Attualmente è in discussione l'impiego dell'acqua di mare nelle torri di raffreddamento di grandi centrali elettriche situate lungo le coste (le poche torri di raffreddamento ad acqua salata esistenti sono in centrali relativamente piccole). Il primo quesito da definire nell'interesse pubblico è se si debba o meno usare per il raffreddamento una qualsiasi quantità supplementare di acqua prelevata lungo il litorale. Secondo i fabbricanti di torri sarebbe tecnologicamente possibile far funzionare una torre di una grande centrale elettrica ad acqua salata. Il costo di investimento di una simile torre sarebbe del 25 per cento circa superiore a quello di una torre ad acqua dolce soprattutto per la necessità di impiegare materiali da costruzione piú costosi ed eliminatori di trasporto di grande efficienza. Anche i costi di manutenzione e di energia occorrenti per questo sistema sarebbero piú elevati a causa dei problemi derivanti dall'uso dell'acqua salata.

In casi particolari può essere necessaria la trasformazione dal sistema a ciclo aperto al sistema a torre di raffreddamento, ma probabilmente ciò non avverrà su vasta scala. Per la trasformazione completa di una centrale della potenza di 800 000 chilowatt, il costo sarebbe di circa 3 milioni di dollari. In aggiunta la trasformazione richiederebbe l'uso supplementare di una altra torre durante alcuni periodi dell'anno nei quali fosse necessario mantenere la temperatura dell'acqua di scarico sotto un livello stabilito.

L'aumento delle dimensioni dei generatori richiederebbe torri di raffreddamento a liquido piú grandi, che si stanno già progettando. Partendo da una tipica grande torre a liquido con tiraggio meccanico ora in uso – una unità a celle multiple larga circa 17 metri alla base e 23 metri alla sommità e alta 100 metri con ventilatori del diametro di 8,50 metri azionati da motori da 200 CV – si può prevedere una progressione verso ventilatori di diametro sempre maggiore e verso un proporzionale aumento delle dimensioni della torre. Le torri attuali sono idonee per il raffreddamento in servizio continuo di centrali alimentate a combustibile fossile con potenza fino a 400 000 chilowatt; per servire una centrale elettrica della potenza di 800 000 chilowatt sarebbero necessarie due unità ognuna di sette celle o piú. In un prossimo futuro una sola torre a liquido con tiraggio meccanico sarà probabilmente capace di servire una centrale alimentata a combustibile fossile con una potenza di un milione di chilowatt, sebbene non siano ancora state stabilite le caratteristiche ambientali ed economiche di una torre del genere.

Questa grande unità generatrice potrebbe anche essere servita da una unica torre di raffreddamento a liquido a tiraggio naturale con un diametro alla base di 125 metri e una altezza di circa 113 metri. Le torri a liquido a tiraggio naturale ora disponibili possono servire una centrale nucleare di potenza non superiore a 1,1 milioni di chilowatt, equivalente, ai fini delle necessità di raffreddamento, a una centrale alimentata a combustibile fossile della potenza di circa 1,65 milioni di chilowatt. Non è previsto in un prossimo futuro un aumento apprezzabile delle attuali dimensioni massime (185 metri di diametro per 150 metri di altezza) delle torri a liquido a tiraggio naturale. Per quanto riguarda le torri a secco non si prevedono grandi cambiamenti nella loro configurazione per le applicazioni alle centrali elettriche rispetto a quelle già largamente usate in impianti industriali del tipo dei grandi complessi petrolchimici. Un attuale modulo standard è lungo 18 metri, largo 46 e ha ventilatori del diametro di 8,50 metri. È previsto, come nelle torri a liquido, un aumento della dimensione dei ventilatori, ma probabilmente la grandezza del modulo rimarrà all'incirca la medesima.

È possibile che, nelle nuove centrali elettriche ubicate nell'entroterra, si diffonda sempre di piú l'impiego delle torri di raffreddamento nei sistemi di refrigerazione ad acqua dei condensatori per turbine a vapore. Può però anche aumentare il numero delle torri funzionanti con acqua di mare. La maggior parte delle nuove torri sarà del tipo a liquido con tiraggio meccanico perché per quasi tutte le applicazioni questo è il sistema piú economico.

In questa particolare illustrazione di riempimento a film è mostrato come viene suddivisa l'acqua che cadendo urta ripetutamente il riempimento e si disperde in goccioline e in sottili lamine. In questo modo essa offre una grande superficie all'aria che si muove dentro la torre. Il raffreddamento è ottenuto principalmente dall'evaporazione di una piccola parte dell'acqua.

L'evoluzione dei quasar

Quando l'universo era giovane c'erano probabilmente molti piú quasar di adesso. La loro luce impiega tanto tempo per giungere fino a noi che possiamo osservarne milioni ormai estinti da tempo

di Maarten Schmidt e Francis Bello

Poiché la luce ha una velocità finita, l'astronomo non potrà mai sperare di vedere l'universo come è attualmente; lungi dall'essere un ostacolo, la finitezza della velocità della luce gli consente di guardare indietro nel tempo, nella misura in cui i suoi strumenti e il suo ingegno glielo permettono. Se riesce a interpretare correttamente i complessi messaggi inviati col codice delle onde elettromagnetiche di diverse lunghezze d'onda, può arrivare a ripercorrere in senso inverso il cammino dell'evoluzione dell'universo, virtualmente fino al momento della creazione. Seguendo le teorie piú in voga, questo momento va situato intorno ai 10 miliardi di anni fa, quando la massa totale dell'universo, concentrata in un piccolissimo volume, esplose, generando la miriade di galassie, radiogalassie e quasar (oggetti di aspetto stellare piú luminosi delle galassie), della cui esistenza ci siamo accorti solo negli ultimi 50 anni.

Le osservazioni ottiche hanno gettato scarsa luce sull'evoluzione delle galassie ordinarie dato che, anche coi telescopi ottici piú potenti, queste galassie non possono essere studiate in dettaglio se si trovano a piú di uno o due miliardi di anni luce di distanza. L'astronomo li vede come erano uno o due miliardi di anni fa, quando la loro età era già di otto o nove miliardi di anni. I quasar, invece, permettono di dare un'occhiata all'aspetto dell'universo qual era otto o nove miliardi di anni fa, quando cioè erano passati solo uno o due miliardi di anni dal « big-bang » (« il grande scoppio ») da cui presumibilmente sono stati originati.

Circa 50 anni fa i primi grandi telescopi avevano permesso di osservare che la luce proveniente dalle galassie lontane è spostata verso la parte rossa dello spettro: piú la galassia è lontana, maggiore è lo spostamento verso il rosso (red-shift), e maggiore la velocità di allontanamento: tutte le galassie, come le uvette di un panettone cosmico che si gonfia, si stanno allontanando una dall'altra. In base alle velocità di allontanamento che si osservano si può calcolare che circa 10 miliardi di anni fa tutta la materia dell'universo era compressa entro un volume molto piccolo.

Il termine quasar, contrazione di *quasi-stellar radio source* venne originariamente impiegato per indicare solo quegli analoghi di tipo stellare di alcune intense radiosorgenti nei cui spettri ottici si hanno red-shift molto maggiori di quelli delle galassie. Non molto tempo dopo, però, venne scoperta una classe di oggetti quasi stellari con red-shift notevoli, che però emettevano poco o nulla alle lunghezze d'onda radio. Adesso si chiamano di solito « quasar » tutti gli oggetti di tipo stellare con grandi red-shift, indipendentemente dalla loro radioemissione.

Questo articolo è basato sull'ipotesi che i red-shift dei quasar siano cosmologici, cioè che siano una conseguenza dell'espansione dell'universo, e perciò collegati direttamente alla distanza del quasar stesso: secondo questa ipotesi i quasar sono oggetti estremamente lontani. Secondo invece un'ipotesi opposta, della quale parleremo alla fine dell'articolo, i quasar sarebbero oggetti relativamente vicini.

Un recente studio dei quasar, eseguito con l'aiuto del telescopio Hale da 5 metri di Monte Palomar, ha fornito le prove che questi oggetti luminosissimi subirono una rapida evoluzione quando l'universo era giovane. Questo studio mostra che c'erano circa 100 volte piú quasar di adesso quando, circa 5 miliardi di anni fa, si formarono il Sole e la Terra. A un'epoca ancora anteriore, diciamo 8 o 9 miliardi di anni fa, erano ancora piú abbondanti, 1000 volte piú di adesso: andando ancora indietro nel tempo, però, è probabile che di quasar ce ne fossero meno, forse perché le condizioni dell'universo non erano favorevoli al loro sviluppo.

Lo studio menzionato prima comprendeva tutti i quasar presenti in due zone del cielo, corrispondenti a un millesimo di tutta la sfera celeste. Estrapolando, si può affermare, con ragionevole fiducia, che un'osservazione di tutto il cielo, fatta col piú grande telescopio, dovrebbe rivelare la presenza di circa 15 milioni di quasar. Per la stragrande maggioranza sono però cosí lontani che, quasi certamente, hanno bruciato tutto il loro combustibile nei miliardi di anni necessari perché la loro luce ci raggiunga. È ovvio che anche adesso possiamo studiarli tutti col tele-

Il quasar piú brillante, nonché il primo oggetto a essere stato riconosciuto come tale è 3C 273, indicato dal reticolo nella fotografia della pagina a fronte. La negativa è tratta da una porzione (2,5 × 3,5 cm) prossima al bordo di una lastra fotografica quadrata di 35,5 cm di lato; la foto è stata presa col telescopio Schmidt da 1,22 metri di Monte Palomar, e costituiva una parte della « National Geographic Society-Palomar Sky Survey ». Nel 1962 si scoprí che la posizione di questo oggetto di tipo stellare coincideva con quella di una intensa radiosorgente, la 273 del terzo catalogo compilato dai radioastronomi dell'Università di Cambridge. La magnitudine ottica di 3C 273 è 13: in tutto il cielo ci sono almeno un milione di stelle di questa grandezza; uno studio dello strano spettro di 3C 273 ha però rivelato che la sua luce era spostata verso il rosso di una quantità corrispondente a una velocità di allontanamento pari a circa un sesto di quella della luce. Questo fatto sta a significare che 3C 273 non era una stella vicina, ma un oggetto celeste distante da uno a due miliardi di anni luce. A questa distanza una intera galassia ci apparirebbe meno luminosa di almeno quattro magnitudini, il che significa che la luminosità intrinseca di 3C 273 è almeno 40 volte quella di una galassia. Il termine « radio sorgente quasi stellare » o « quasar » venne coniato proprio per descrivere 3C 273 e altri oggetti stellari con notevole spostamento verso il rosso.

scopio: se però fosse possibile gettare uno sguardo istantaneo sull'universo, si troverebbe che attualmente esistono solo circa 35 000 quasar che irraggiano con la loro intensità caratteristica. Tutto questo è in contraddizione con l'ipotesi dello « stato stazionario », secondo la quale l'universo ha sempre avuto l'aspetto che ha attualmente; sempre secondo questa ipotesi, viene continuamente creata della nuova materia per far sí che la densità dell'universo in espansione rimanga costante.

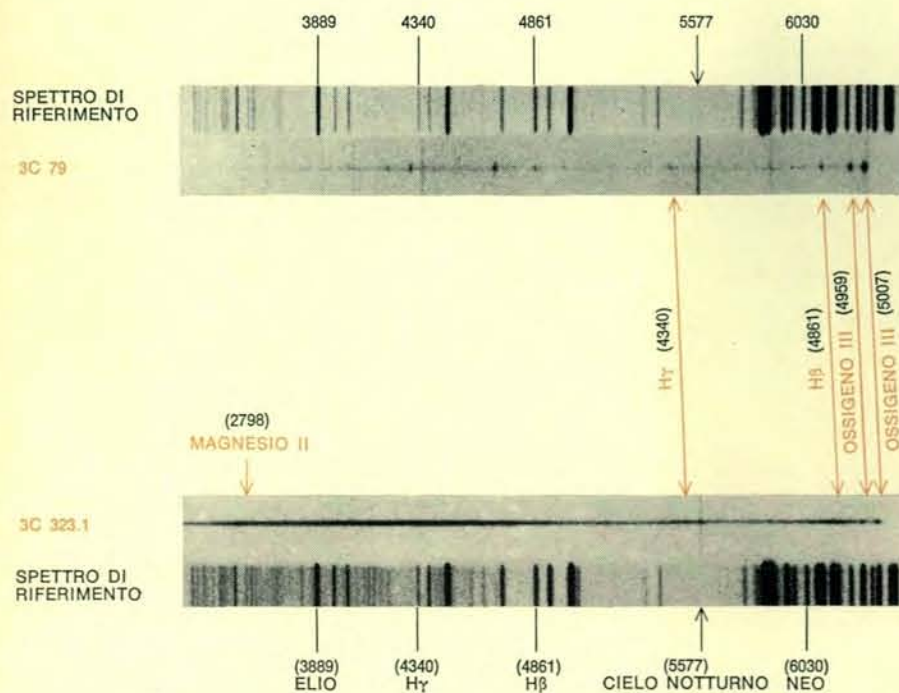
Dopo 10 anni di intensi studi da parte degli astronomi ottici e dei radioastronomi, i quasar restano tuttora tra gli oggetti celesti piú enigmatici. Facendo l'ipotesi che si trovino a distanze cosmologiche, si può dimostrare facilmente che molti quasar sono da 50 a 100 volte piú brillanti di intere galassie composte di centinaia di miliardi di stelle. Si è osservato che la luminosità di alcuni quasar, a differenza di quella delle galassie « normali », varia considerevolmente nel giro di pochi giorni: l'unica spiegazione è che qualche componente variabile di un quasar, se non tutto il quasar stesso, possa essere non piú grande del sistema solare.

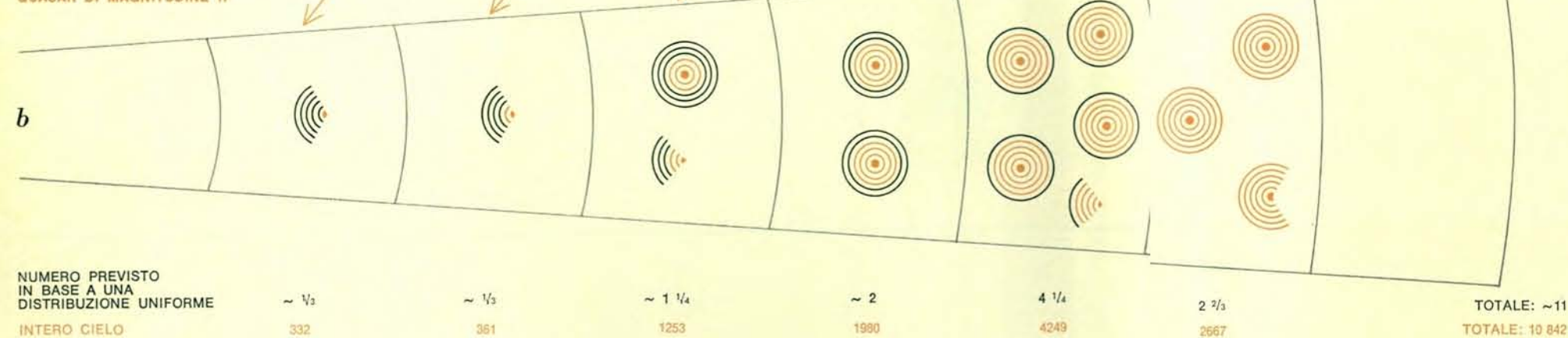
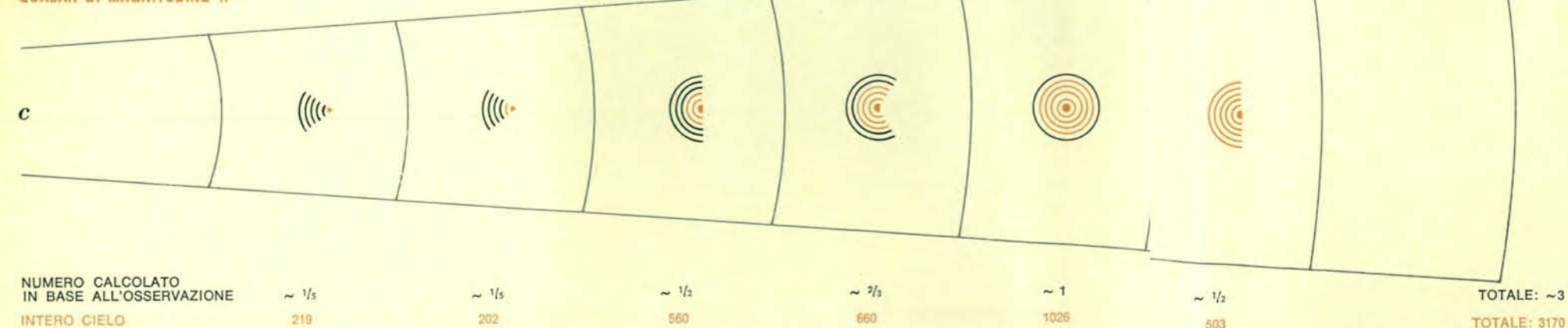
La scoperta dei quasar

Prima del 1960 i radioastronomi avevano individuato e catalogato centinaia di radiosorgenti, cioè di oggetti celesti invisibili che emettono radiazioni a frequenza radio; di tanto in tanto poi, gli astronomi ottici riuscivano a identificare un oggetto – di solito una galassia – la cui posizione coincideva con quella della radiosorgente: dopo di che l'oggetto in questione veniva chiamato « radiogalassia ». La maggior parte delle radiosorgenti però, non veniva identificata, e in genere si pensava che la sorgente della radioemissione fosse una galassia troppo distante, o almeno troppo luminosa, perché fosse possibile fotografarla.

Nel 1960 Thomas Matthews e Allan Sandage scoprirono per primi un oggetto di tipo stellare nella posizione data per una radiosorgente nel Terzo catalogo di Cambridge (3 C), compilato da Martin Ryle e dai suoi collaboratori all'Università di Cambridge. La posizione della radiosorgente 3C 48 coincideva con quella di una stella di sedicesima grandezza nel cui spettro c'erano delle larghe righe di emissione che non fu possibile riconoscere. Questo oggetto, non solo emetteva molta piú radiazione ultravioletta di qualsiasi stella « normale » della stessa grandezza, ma aveva anche una luminosità che variava di oltre il 40 % in un anno.

L'oggetto celeste 3C 48 venne ritenuto un caso unico di stella radioemittente della nostra galassia fino al 1963, quando l'intensa radiosorgente 3C 273 venne identificata con un oggetto di tipo stellare di tredicesima grandezza, e quando uno di noi (Schmidt) riconobbe che la maggior parte delle enigmatiche righe spettrali potevano essere interpretate come le righe dell'idrogeno della serie di Balmer, la cui lunghezza d'onda fosse spostata verso il rosso del 15,8 %, cioè di 0,158 (*si veda la figura a pagina 74 e la figura in alto a*

Parte dello spettro del quasar 3C 273 che mostra tre marcate righe di emissione situate rispettivamente a 4750, 5030 e 5630 angstrom, corrispondenti alle righe di emissione dell'idrogeno, delta, gamma e beta nella serie di Balmer. La parte superiore e inferiore dello spettro, per facilitarne lo studio, hanno avuto esposizioni diverse. Le tre righe di emissione sono prodotte da atomi di idrogeno che si trovano in stati eccitati diversi. Due delle tre righe, H gamma e H beta, si vedono anche nello spettro di riferimento situate alle loro normali lunghezze d'onda di emissione: 4340 e 4861 angstrom. La lunghezza d'onda normale per la riga H delta è 4102 angstrom. Per ottenere il red-shift Z, si sottrae dalla lunghezza d'onda osservata la lunghezza d'onda normale e si divide la differenza ottenuta per la lunghezza d'onda normale. Per 3C 273 Z è 0,158, il che significa che il quasar si sta allontanando a una velocità che è circa un sesto di quella della luce. La riga ben definita a 5577 angstrom compare spesso negli spettri di oggetti astronomici e rappresenta un utile punto di riferimento: è prodotta da atomi di ossigeno eccitati che si trovano nella parte superiore dell'atmosfera. Questo e altri spettrogrammi compresi in questo articolo sono stati fatti da uno degli autori (Schmidt).

Questi due spettri mostrano la differenza tra un quasar e una radiogalassia. Quello in alto è lo spettro della intensa radiogalassia 3C 79 che ha red-shift di 0,256. Quello in basso è lo spettro del quasar 3C 323.1 che ha un red-shift appena un po' piú grande: 0,264. La radiogalassia produce un notevole numero di righe di emissione ben definite. Quattro di queste righe nella parte destra del suo spettro sono individuate e confrontate con le corrispondenti righe, molto meno nette, dello spettro del quasar. Caratteristica dei quasar è di avere una intensa attività di emissione nell'ultravioletto. Lo ione comune che emette radiazione, è quello del magnesio ionizzato una sola volta, il magnesio II, la cui lunghezza d'onda d'emissione risulta essere di 2798 angstrom.

Quattro spettri di quasar sono disposti in un diagramma che mostra come una radiazione emessa miliardi di anni fa a una ben determinata lunghezza d'onda si sia « stirata » durante il suo lungo viaggio attraverso lo spazio, per l'espansione che noi riteniamo sia in atto nell'universo. Per determinare il red-shift di un oggetto astronomico sono necessarie almeno due lunghezze d'onda. Una sola riga potrebbe rappresentare una riga qualsiasi spostata di una quantità arbitraria. In questa figura le righe oblique scure piú grosse corrispondono alla radiazione emessa dall'idrogeno (alfa Lyman), dal carbonio IV, dal carbonio III, dal magnesio II e dall'idrogeno (gamma Lyman). I numeri romani sono sempre superiori di una unità al numero di elettroni che mancano all'atomo. Per un red-shift $Z = 1$ si può osservare la linea alfa Lyman a 2432 angstrom, con un red-shift di 2 si osserva la riga a 3648 angstrom, e con red-shift di 3 la riga apparirebbe a 4864 angstrom. Pertanto, quando Z è uguale a 3, la lunghezza d'onda iniziale è stata esattamente triplicata. La quantità $1+Z$ esprime di quanto si è espanso l'universo tra l'istante in cui un fotone viene emesso e l'istante in cui lo si osserva. Si conoscono solo due quasar con un red-shift superiore a 2,5: uno è PHL 957, il cui spettro si vede in questa figura. Questo spettro è stato ottenuto con uno spettrografo speciale, gli altri sono stati registrati direttamente su pellicola fotografica. I fotoni che producono lo spettro di PHL 957 (il piú basso in figura) abbandonarono il quasar quando l'età dell'universo era solo il 13 % di quella attuale.

Una valutazione del numero di quasar è stata fatta determinando il red-shift di tutti i quasar di una zona campione che rappresenta un millesimo del cielo intero. Questo campione era formato da 20 quasar di magnitudine ottica, o apparente, di circa 1,8. Risultava tuttavia chiaro dal loro red-shift che alcuni erano molto piú lontani di altri, e perciò intrinsecamente piú luminosi (*a*). Gli intervalli di red-shift sono stati scelti in modo che la luminosità assoluta dei quasar, in ogni data « crosta sferica » dell'universo, sia in media superiore di una magnitudine (2,5 volte) a quella dei quasar della crosta successiva piú interna. Perciò i quattro quasar nel settore campione, che rappresenta la crosta sferica piú lontana (red-shift da 1,58 a 2,51), sono cento volte piú luminosi dell'unico quasar nel settore con red-shift tra 0,16 e 0,25. Ora, se i quasar fossero distribuiti uniformemente nello spazio e ce ne fossero 4000 di luminosità massima nella crosta sferica piú lontana, quello che ci si aspetterebbe di trovarne nella crosta successiva piú interna un numero proporzionale al suo volume, che è solo due terzi di quello della crosta piú esterna. I due terzi di 4000 sono 2667. Pertanto il diagramma *b* mostra che nell'intervallo di red-shift tra 1 e 1,58 ci si aspetterebbe di trovare nell'intero cielo 2667 quasar di luminosità massima. Nelle fotografie la luminosità di questi 2667 quasar dovrebbe apparire superiore di una magnitudine (magnitudine 17) rispetto a quella dei 4000 quasar che hanno la stessa luminosità intrinseca ma che sono piú lontani. In base alle stesse ipotesi si può fare una valutazione del numero di quasar in strati ancor piú vicini. Il numero totale è 10 842, distribuito come si vede in *b*. Si conclude perciò che, se i quasar sono distribuiti uniformemente, si dovrebbe osservare un numero di quasar di magnitudine 18 almeno doppio di quello dei quasar di magnitudine 17. In effetti però dalle osservazioni risulta che per magnitudine, il numero di quasar, supera di un fattore sei quello previsto teoricamente. Per giustificare tali osservazioni ci dovrebbero essere, in tutto il cielo, solo circa 3000 quasar di diciassettesima magnitudine. In *c* è mostrata la corretta distribuzione di red-shift nel caso in cui si tiene conto di questo numero approssimativo di quasar.

pag. 76). I red-shift sono espressi di solito mediante la frazione, o la percentuale, che si ottiene dividendo lo spostamento di una data riga spettrale per la lunghezza d'onda della stessa riga non spostata. Su questa base fu subito evidente che le righe dello spettro di 3C 48 avevano un red-shift di 0,367.

Red-shift tanto grandi, corrispondenti a una velocità che è una frazione rilevante della velocità della luce, fecero cadere l'ipotesi che 3C 273 e 3C 48 fossero stelle della nostra galassia. Si avanzò l'ipotesi che i red-shift fossero cosmologici, il che implicava che questi due oggetti distassero da noi miliardi di anni di luce e che fossero perciò estremamente luminosi, per apparire tanto brillanti nel nostro cielo notturno. Ben presto vennero battezzati quasar, e nel giro di pochi anni vennero scoperti altri quasar con red-shift ancora maggiori, compresi alcuni con red-shift maggiore di 2, ossia sei volte maggiore del massimo red-shift mai osservato nel caso di una galassia ordinaria. Sulla base dell'ipotesi cosmologica, un red-shift di 2 sta a indicare che la luce proveniente dall'oggetto ha viaggiato per un tempo pari all'80 % dell'età dell'universo.

I quasar « tranquilli »

Attualmente parecchie centinaia di radiosorgenti sono state riconosciute come oggetti di tipo stellare. Per la maggior parte, questi riconoscimenti sono avvenuti sulla base delle posizioni fornite da due o piú radiotelescopi distanti da qualche centinaia di metri a qualche migliaio di chilometri, e funzionanti come interferometri. Questa tecnica fornisce una misura accurata della differenza tra i tempi necessari alle radioonde per compiere il tragitto dalla sorgente a ciascun telescopio dell'interferometro, e permette di localizzare la sorgente stessa con un'approssimazione compresa tra 1 secondo e 15 secondi d'arco. Quando alla fine la ricerca è stata ristretta e si è trovato un oggetto ottico candidato al ruolo di quasar, la prova finale consiste nel vedere se nel suo spettro c'è un red-shift; di solito, oltre la metà degli oggetti individuati sulla base della loro posizione radio risultano essere quasar. La prova spettroscopica è sicura, dato che il massimo red-shift finora rilevato per una stella è di 0,002, mentre il minimo red-shift per un quasar identificato con radioosservazioni è 0,158 (per 3C 273).

Da parecchio tempo si era notato che i quasar emettono intensamente nella zona ultravioletta dello spettro; nel 1964, quando le posizioni radio erano note con una precisione molto minore di quella attuale, Ryle e Sandage pensarono di utilizzare l'intensità dell'emissione ultravioletta per cercare gli analoghi ottici delle radiosorgenti. La loro tecnica consisteva nel fotografare una certa zona del cielo in luce blu, poi esporre la stessa lastra fotografica, leggermente spostata rispetto alla prima esposizione, in luce ultravioletta; guardando la lastra era possibile distinguere facilmente dalle stelle normali gli oggetti che emettevano molto nell'ultravioletto.

Nel 1965 Sandage notò che gli oggetti con forte emissione ultravioletta erano, in campi stellari caratteristici, molto piú numerosi delle radiosorgenti note; ben presto scoprí che alcuni di questi « oggetti stellari blu » avevano red-shift tali da qualificarli come quasar, anche se non era stata rivelata alcuna radioemissione. La maggior parte degli altri oggetti che avevano una forte emissione nell'ultravioletto risultarono essere stelle nane bianche della nostra galassia: solo una piccola parte dei quasar, però, hanno un'intensa radioemissione. Gli altri sono quieti, o praticamente tali. Può darsi che un quasar tipico sia un forte emettitore radio solo per una breve parte della sua esistenza, oppure che siano relativamente pochi i quasar nati per essere radiosorgenti intense.

Due anni fa Sandage e Willem J. Luyten pubblicarono le analisi fotometriche di 301 oggetti blu compresi in sette zone celesti. Essi contarono i possibili quasar scelti tra questi oggetti blu e stimarono che, in un grado quadrato di cielo (circa cinque volte l'area di cielo occupata dalla Luna), ci sono in media 0,4 quasar piú luminosi della magnitudine 18,1; stimarono anche che c'erano cinque quasar per grado quadrato piú luminosi della magnitudine 19,4 e che si poteva supporre ce ne fossero circa 100 piú luminosi di 21,4. Stimarono anche che, in tutto il cielo, ci potessero essere 10 milioni di quasar piú luminosi della ventiduesima magnitudine.

Maggiore è la magnitudine minore è, per definizione, la luminosità dell'oggetto; a ogni aumento di cinque magnitudini (per esempio dalla diciottesima alla ventitreesima) corrisponde infatti una diminuzione della luminosità di un fattore 100. Il numero di quasar aumenta bruscamente all'aumentare della magnitudine, di circa un fattore 6 per magnitudine; questo aumento brusco risulta, come vedremo in seguito, incompatibile con una distribuzione uniforme dei quasar nello spazio.

Conteggio dei « veri » quasar

Gli oggetti isolati da Sandage e Luyten sono definiti come « oggetti blu deboli con radiazione ultravioletta in eccesso ». Per uno studio statistico dettagliato è necessario avere lo spettro di ogni singolo candidato « blu debole » per stabilire se esso sia realmente un quasar oppure no. Uno degli autori (Schmidt) iniziò circa quattro anni fa tale raccolta, lavorando su parecchie delle zone celesti esaminate da Sandage e Luyten. Lo scopo finale dello studio è stabilire come sono distribuiti i quasar per quanto riguarda il red-shift (distanza) e la luminosità.

Dei 55 oggetti blu deboli esaminati in due delle zone Sandage-Luyten, risultò che 32 avevano un red-shift trascurabile e pertanto si potevano scartare, trattandosi di stelle nane entro la nostra galassia. I restanti 23 oggetti presentavano spettri caratteristici dei quasar e tutti gli spettri, eccetto uno, contenevano almeno due righe, il che è quanto risulta necessario per stabilire un red-shift. Una riga singola potrebbe rappresentare praticamente quella di qualsiasi atomo emettitore, spostata di una quantità arbitraria. Però, quando uno spettro contiene due righe, è quasi sempre possibile trovare un unico valore del red-shift che individua, per ciascuna riga, una lunghezza d'onda in modo abbastanza ragionevole *(si veda la figura a pag. 77)*. Sfortunatamente gli spettri di alcuni quasar presentano una sola riga ben definita, e i tentativi di stabilire il red-shift restano perciò vani. Sebbene i red-shift attribuiti a parecchi oggetti siano solo preliminari, la distribuzione generale dovrebbe essere sostanzialmente corretta. I red-shift vanno da 0,18 a 2,21. Nessuno di questi 23 quasar compare nei cataloghi di radiosorgenti intense.

A questo punto sarà molto piú utile concentrarsi, nella discussione, sui quasar campione di diciottesima magnitudine. Ci sono venti quasar di questo tipo. Poiché, però, questi venti oggetti presentano tutta una serie di red-shift, ne deduciamo che si devono trovare a distanze enormemente diverse e devono perciò differire molto come luminosità *assoluta*, anche se a un osservatore può sembrare che essi abbiano la stessa luminosità.

Per mostrare tali differenze in luminosità assoluta si possono classificare gli oggetti in base al red-shift in modo tale che ogni categoria di red-shift rappresenti un salto di una magnitudine in luminosità assoluta. La relazione tra il red-shift e la magnitudine di una sorgente standard dipende dalle proprietà dell'universo. Secondo il modello cosmologico seguito in questo studio, un quasar di diciottesima magnitudine con un red-shift che cada nell'intervallo tra 0,25 e 0,4 è di una magnitudine intrinsecamente piú luminoso di un oggetto piú vicino il cui red-shift stia tra 0,16 e 0,25. Per coprire tutto il campo dei red-shift effettivi dei 20 oggetti sono sufficienti venti categorie di red-shift, ciascuna corrispondente a un salto di una magnitudine in luminosità assoluta. I membri piú luminosi del gruppo sono quelli di cinque magnitudini (o 100 volte) piú brillanti del meno luminoso.

Quando i 20 quasar furono raggruppati in questo modo in base al red-shift, si trovò che la loro distribuzione era simile a quella, sempre in base al red-shift, dei radioquasar della stessa magnitudine ottica. Tenendo conto di ciò, e semplificando un po' le cose, fu adottata per le analisi successive la seguente distribuzione per i red-shift dei quasar di diciottesima magnitudine:

red-shift	1,58—2,51	20 per cento
red-shift	1,00—1,58	35 per cento
red-shift	0,63—1,00	20 per cento
red-shift	0,40—0,63	15 per cento
red-shift	0,25—0,40	5 per cento
red-shift	0,16—0,25	5 per cento

L'analisi di Sandage e Luyten ha mostrato che ci sono all'incirca 20 000 quasar di magnitudine apparente 18; esattamente 1000 volte di piú di quelli del campione di cui abbiamo appena riferito. Se i 20 000 quasar fossero distribuiti secondo le percentuali sopra elencate, si troverebbe che il numero di quasar in ciascuna categoria di red-shift, a partire dai piú alti, è il seguente: 4000, 7000, 4000, 3000, 1000 e 1000. È chiaro che, nel campione scelto a caso di quasar di diciottesima magnitudine, piú della metà sono estremamente distanti (red-shift maggiore di 1) e appartengono quindi ai membri piú luminosi della loro classe. Un red-shift di 1 corrisponde a uno sguardo nel passato pari ai due terzi del tempo che è trascorso da quando l'universo cominciò a espandersi.

Passando allo stadio successivo dell'analisi si vorrebbe calcolare il numero di quasar la cui magnitudine apparente è superiore o inferiore a 18 e stabilire come essi siano distribuiti in base al red-shift. Per far ciò si deve conoscere il volume delle croste sferiche successive dell'universo in cui abbiamo collocato i nostri quasar di diciottesima magnitudine. Tali volumi dipendono dal modello cosmologico che si segue. L'unità di volume che abbiamo adottato corrisponde a 10^{27} anni luce cubi, cioè a un cubo il cui spigolo è pari a un miliardo di anni luce; questa unità è, per cosí dire, « comovente », il che significa che, indipendentemente dal red-shift, l'unità di volume si espande assieme all'universo.

I 4000 quasar piú luminosi e piú distanti (red-shift da 1,58 a 2,51) occupano una crosta di volume pari a 729×10^{27} anni luce cubi. Il problema ora è di utilizzare queste informazioni per calcolare quanti quasar della stessa luminosità assoluta ci dovrebbero essere nello strato immediatamente piú interno, con red-shift tra 1 e 1,58. Questa crosta sferica ha un volume, secondo il modello cosmologico che abbiamo scelto, di 486×10^{27} anni luce cubi, pari cioè ai due terzi del volume dello strato piú esterno. Se i quasar fossero distribuiti uniformemente nello spazio, la crosta sferica piú interna dovrebbe contenerne i due terzi di 4000, cioè 2667 quasar, proprio come la crosta piú esterna. Se i quasar di quella luminosità intrinseca venissero perciò spostati di una crosta sferica piú vicino a noi, la loro luminosità apparente, come noi la osserviamo, dovrebbe aumentare di una magnitudine, cioè avere magnitudine 17 invece di magnitudine 18 (*si vedano le figure a pagina 78 e 79*). Bisogna ricordare che gli intervalli di red-shift sono stati scelti proprio in modo che ogni gradino corrisponda a un cambiamento in luminosità di una magnitudine.

Un calcolo analogo è stato portato a termine per i quasar di diciottesima magnitudine di ciascuna delle altre categorie di red-shift. In ogni caso il numero di quasar che si prevede ci siano nella crosta sferica piú interna di quella precedente, si calcola facendo l'ipotesi che i quasar siano distribuiti uniformemente nello spazio.

Tale calcolo porta ai seguenti numeri addizionali: 4249, 1980, 1253, 361, e 332. Se questi vengono aggiunti al numero 2667 calcolato precedentemente, si ottiene un totale di 10 842 quasar di magnitudine 17, circa la metà del numero di quasar di magnitudine 18 che ci si aspetta di trovare (nell'ipotesi di una distribuzione uniforme).

Ricordiamo che secondo l'analisi di Sandage e Luyten, il numero di oggetti del tipo quasar aumenta non di un fattore due per magnitudine (da 10 842 a 20 000 secondo il calcolo appena fatto) bensí di circa un fattore sei. In altri termini, la loro statistica prevede solo 3000 o 4000 quasar di magnitudine apparente 17, invece di 10 842.

Quello che in pratica comporta il fattore sei è che ci siano piú quasar deboli di quanto ci si aspetterebbe se lo spazio fosse riempito uniformemente di quasar. L'unica spiegazione plausibile è che la densità di quasar aumenti all'aumentare della distanza, cioè quanto piú guardiamo indietro nel tempo. Per giungere a una legge di distribuzione che soddisfi le osservazioni sperimentali, bisogna supporre che la densità sia proporzionale a una qualche potenza n nella scala dell'universo. La scala, o dimensione, dell'universo, è inversamente proporzionale alla quantità di cui è stata « stirata » la luce a causa dell'espansione dell'universo. Pertanto se la riga alfa della serie di Lyman, emessa a 1216 angstrom, viene osser-

RED SHIFT (Z)	VOLUME DELL'UNIVERSO (10^{27} ANNI LUCE CUBI)	NUMERO DI QUASAR NELL'INTERO CIELO: MAGNITUDINE 17 DISTRIBUZIONE CORRETTA ~ $(1 + Z)^6$	MAGNITUDINE 17 DISTRIBUZIONE UNIFORME	MAGNITUDINE 18 DEDOTTA DALLE OSSERVAZIONI
1,58—2,51	729			4000
1,00—1,58	486	503	2667	7000
0,63—1,00	295	1026	4249	4000
0,40—0,63	146	660	1980	3000
0,25—0,40	61	560	1253	1000
0,16—0,25	22	202	361	1000
0,10—0,16	7,3	219	332	
		3170	10 842	20 000

Distribuzione dei quasar secondo il red-shift per 20 000 quasar di diciottesima magnitudine ottica (*colonna piú a destra*) basata su un campione rappresentativo di 20 quasar. La colonna adiacente mostra due diverse valutazioni del numero di quasar di diciassettesima magnitudine. I metodi per fare tali valutazioni sono spiegati nelle figure delle due pagine precedenti, dove gli stessi numeri compaiono nei diagrammi *b* e *c*. Dalle osservazioni si ha che il numero di quasar è superiore, per ogni magnitudine, di circa un fattore sei invece che di un fattore due, come ci si aspetterebbe se i quasar fossero distribuiti uniformemente nello spazio. Si può ottenere la distribuzione realmente osservata, moltiplicando il volume della crosta sferica dell'universo per $(1 + Z)^6$, dove Z è il red-shift e l'esponente 6 è un valore determinato sperimentalmente che dà proprio l'aumento che si desidera per ciascuna magnitudine. La tabella in alto mostra il numero e il red-shift di tutti i quasar con magnitudine compresa tra 13 e 23.

RED-SHIFT (Z)	VOLUME DELL'UNIVERSO (10^{27} ANNI LUCE CUBI)	VOLUME DELL'UNIVERSO X $(1 + Z)^6$	MAGNITUDINE VISUALE APPROSSIMATIVA: 13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
1,58 - 2,51	729	593 000	–	—	—	—	—	4000	56 000	217 000	1 000 000	2 000 000	9 000 000
1,00 - 1,58	486	74 600	–	—	—	—	503	7000	27 000	124 000	200 000	1 000 000	—
0,63 - 1,00	295	10 900	–	—	—	74	1026	4000	18 000	32 000	200 000	—	—
0,40 - 0,63	146	1800	–	—	12	169	660	3000	5000	27 000	—	—	—
0,25 - 0,40	61	336	–	2	32	123	560	1000	5000	—	—	—	—
0,16 - 0,25	22	68	0	6	25	113	202	1000	—	—	—	—	—
0,10 - 0,16	7,3	15	1	6	25	44	219	—	—	—	—	—	—
0,06 - 0,10	2,1	3,4	1	6	10	50	—	—	—	—	—	—	—
0,04 - 0,06	0,59	0,8	1	2	12	—	—	—	—	—	—	—	—
0,025 - 0,04	0,16	0,19	1	3	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,016 - 0,025	0,04	0,05	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
			5	25	116	573	3170	20 000	111 000	400 000	1 400 000	3 000 000	9 000 000

Si è calcolato che la popolazione totale di quasar dell'universo sia dell'ordine di 14 milioni, di cui piú del 99,7 % sono evidentemente piú deboli della diciassettesima magnitudine e hanno un red-shift superiore a 0,4. Dalla tredicesima alla diciottesima magnitudine visuale, il numero dei quasar aumenta di un fattore cinque o sei in corrispondenza della diminuzione in luminosità di una magnitudine. Oltre la diciottesima magnitudine però l'aumento rallenta poiché nella tabella non sono registrati quasar con red-shift superiore a 2,5. In effetti si conoscono solo due quasar con red-shift maggiore, il che fa sorgere l'ipotesi che ci sia una effettiva scarsità di tali oggetti. Qualsiasi quasar con un red-shift di 2,5 è cosí distante che la sua luce ha continuato a viaggiare attraverso lo spazio per piú dell'ottantacinque per cento dell'età dell'universo. La luce proveniente da piú di 13,5 milioni di quasar con red-shift superiore a 1, è in viaggio da almeno 6-8 miliardi di anni, se si fa l'ipotesi che l'età dell'universo sia dell'ordine dei 10 miliardi di anni. Poiché la vita di un quasar probabilmente non supera di molto quella di un miliardo di anni, la stragrande maggioranza dei quasar mai esistita si sarà ormai evoluta in oggetti meno luminosi, probabilmente in galassie ordinarie. Si può calcolare che oggi esistano solo 35 000 quasar.

Le variazioni di densità dei quasar nel tempo si può dedurre dalla tabella riportata nelle due pagine precedenti. La curva mostra che il numero dei quasar aumenta gradualmente all'aumentare del red-shift, il che è equivalente a guardare indietro nel tempo. Sicché se si guardasse indietro per un tempo pari al 68 % dell'età dell'universo, in un volume di spazio in cui ora c'è un solo quasar se ne troverebbero piú di 60. Guardando indietro per un tempo pari all'83 % dell'età dell'universo, nello stesso volume si troverebbero piú di 700 quasar. La densità massima può essere stata raggiunta quando l'universo aveva solo circa il 14 % dell'età attuale. È la scarsità di quasar con red-shift superiore a 2,5 che fa pensare che la densità non sia stata prima piú elevata.

vata a 3648 angstrom, si può dire che l'universo ha subito un'espansione di un fattore tre dal momento in cui la radiazione lasciò la sorgente emettitrice. Poiché il red-shift in questo caso è 2 (3648 meno 1216 diviso 1216) è chiaro che la scala dell'universo è data non da z ma da $1 + z$. La legge della densità cercata è perciò $(1 + z)^n$.

Il valore di n si ottiene semplicemente per approssimazioni successive fino ad arrivare a circa 3000 quasar di magnitudine 17 (*si veda la figura a pagina 80*). Del tutto casualmente risulta di nuovo che il valore di n è 6. È solo una coincidenza che n sia 6 e che l'aumento nel numero dei quasar per magnitudine sia anche 6. Con questa legge di densità è molto semplice estendere la tabella della distribuzione al disotto della magnitudine 17 e al disopra della magnitudine 18 (*si veda la figura alle pagine 80 e 81*).

In basso, nella tabella, si può leggere il numero di quasar previsto nel cielo intero, per ogni magnitudine. Considerando le cinque magnitudini piú luminose della magnitudine 18, la popolazione di quasar prevista teoricamente diminuisce costantemente a ogni salto da 3170 (diciassettesima magnitudine) a 573 (sedicesima) a 116 (quindicesima) a 25 (quattordicesima) e infine a 5 (tredicesima). Considerando invece le cinque magnitudini piú deboli di 18 la popolazione prevista teoricamente aumenta rapidamente a ogni salto da 110 000 (diciannovesima magnitudine) a 400 000 (ventesima) a 1,4 milioni (ventunesima) a 3 milioni (ventiduesima) e infine a 9 milioni (ventitreesima). La popolazione di quasar valutata complessivamente da magnitudine 13 a magnitudine 23 compresa, è di circa 14 milioni.

Nella tabella non sono registrati quasar con red-shift superiore a 2,5. Attualmente si conoscono solo due quasar con red-shift superiore: uno, PHL 957, ha un red-shift di 2,69; l'altro, 4C 05.34, ha un red-shift di 2,88. Se la legge di densità $(1 + z)^6$ continuasse a valere, si dovrebbe prevedere un grande numero di quasar di diciannovesima magnitudine con red-shift superiore a 2,5. La scarsità di tali oggetti fa sorgere l'ipotesi che oltre 2,5 la densità non solo non aumenti piú, ma che addirittura possa diminuire.

Il fatto che quasar con red-shift maggiore di 2,5 siano molto probabilmente rari, comporta che i piú grandi telescopi sono in grado di guardare indietro nel tempo fino all'epoca in cui i quasar fecero la loro prima comparsa nell'universo. Si può dire, però in relazione al modello cosmologico scelto, che la luce di un quasar con red-shift di 2,5 incominciò il suo viaggio attraverso lo spazio qualcosa come 8,6 miliardi di anni fa, cioè circa un miliardo e mezzo di anni dopo il grande scoppio che (forse) creò l'universo come lo conosciamo oggi. Nell'arco dei pochi miliardi di anni successivi, la maggior parte dei quasar nacque e iniziò la sua breve ma brillante carriera (*si veda la figura nella pagina a fronte*).

Si può calcolare che l'universo contenga attualmente all'incirca solo 35 000 quasar. Tutti gli altri si sono presumibilmente evoluti in oggetti meno notevoli, probabilmente galassie ordinarie. Noi sappiamo della loro esistenza perché i loro segnali, emessi miliardi di anni fa, stanno raggiungendo i nostri telescopi soltanto ora. I quasar di luminosità intrinseca piú bassa (quelli in fondo alla tabella delle due pagine precedenti) non sono piú luminosi di quanto lo siano le grandi galassie. Non si sa perciò con certezza se siano tutti quasar o se si tratti di galassie compatte di qualche altro tipo. Per eliminare questa incertezza si potrebbero omettere nella tabella tutti i quasar elencati nelle due categorie piú basse (le meno luminose). Il restante numero di quasar ad « alta luminosità » in tutto il cielo, sarebbe di circa un milione e mezzo, e il numero di quasar esistenti nell'epoca attuale cadrebbe a soli 3500.

Un altro modo per considerare la popolazione dei quasar, sviluppato in questa analisi, è quello di confrontare il numero di quasar con il numero di galassie in un dato volume di spazio. Un volume di 10^{27} anni luce cubi, nelle nostre vicinanze, contiene circa 20 quasar, di cui solo due sono oggetti di alta luminosità. In modo molto approssimativo, lo stesso volume contiene probabilmente da un milione a 10 milioni di galassie.

Lo studio descritto sopra riguarda quasar scelti soltanto in base alle loro proprietà ottiche; la emissione radio, se c'è, è trascurabile. È perciò importante domandarsi se anche i quasar scelti in base alla loro luminosità ottica presentino un aumento in densità all'aumentare della distanza. Il catalogo 3C, menzionato sopra, è una raccolta esauriente di tutte le radiosorgenti che si trovano nella metà settentrionale del cielo con una certa intensità radio. (Il valore minimo è nove « unità di flusso » a 178 megahertz o 9×10^{-26} watt per metro quadro per hertz). Dal 1960 a oggi, 44 delle 300 sorgenti radio extragalattiche che sono state aggiunte nel catalogo 3C sono state riconosciute come quasar. Di questi 44 oggetti, 33 hanno una magnitudine ottica di 18,5 o anche superiore, e c'è pertanto motivo di ritenere che i 33 oggetti rappresentino praticamente tutti i quasar di 3C al disotto di quella magnitudine limite.

Radioquasar

L'analisi della distribuzione dei 33 oggetti è complicata da una duplice limitazione, ottica e radio, che si presenta nella loro scelta. Questo significa che un oggetto, per essere incluso nella lista dei 33 quasar, deve irraggiare intensamente in due zone dello spettro molto distanti tra loro, cioè nella regione radio e nella regione ottica. L'analisi fatta da uno degli autori (Schmidt) è stata la seguente.

Partendo dal red-shift si calcolò la distanza da ciascun oggetto basandosi su qualche modello particolare dell'universo in espansione. Questa distanza era uguale al raggio del volume di spazio entro il quale l'oggetto era osservato effettivamente. Era allora possibile chiedersi di quanto l'oggetto in questione può allontanarsi prima che succeda una di queste due cose: o la sua magnitudine apparente scende al disotto di 18,5 o il suo flusso di radioonde scende al disotto delle nove unità. Questa distanza definisce il raggio del massimo volume al di là del quale l'oggetto non potrebbe piú stare, pur rimanendo membro della stessa classe di oggetti stellari.

Per ogni oggetto si può esprimere il rapporto fra i due volumi, cioè fra quello effettivo e quello massimo, sotto forma di numero decimale. A priori, se i 33 oggetti fossero distribuiti uniformemente, ci si dovrebbe attendere che il valore medio di questo numero fosse 0,5; ci si dovrebbe attendere, cioè, che metà dei valori siano minori di 0,5 e l'altra metà siano compresi tra 0,5 e 1. In realtà valori inferiori a 0,5 si hanno per sei oggetti soltanto, mentre per 27 oggetti il valore è maggiore. In altri termini, i radioquasar tendono a occupare le zone esterne del volume entro il quale possono essere osservati. Questo ci dice che la loro densità aumenta con l'aumentare della distanza. La legge della densità, una volta che sia stata completata nei dettagli, dice che essa è compresa tra $(1 + z)^5$ e $(1 + z)^6$, cioè che è molto simile alla legge della densità ottenuta per i quasar scelti otticamente, che in media, hanno radioemissione trascurabile. La conclusione è che i quasar hanno una distribuzione di densità che dipende molto poco, o non dipende del tutto, dalle loro proprietà radio. Questo però lascia ancora aperte le due possibilità già citate: la maggior parte dei quasar attraversa un breve stadio evolutivo durante il quale ha un'intensa attività di radioemissione oppure solo una piccola parte di tutti i quasar è destinata a evolversi in intensi radioemettitori.

Altre ipotesi sui quasar

Un certo numero di astronomi e di fisici teorici trovò all'inizio difficile accettare l'idea che il red-shift fosse cosmologico. Non riuscivano infatti a spiegarsi come fosse possibile per un oggetto stellare emettere tanta luce quanta viene emessa da 100 galassie e per di piú manifestare variazioni d'intensità del 10 % o anche di piú, in pochi giorni. Formularono allora l'ipotesi che i quasar fossero oggetti piú piccoli e piú vicini, scagliati fuori dal centro della nostra galassia ad alta velocità. Questa viene talvolta chiamata l'ipotesi Doppler-locale perché il red-shift è uno spostamento dovuto all'effetto Doppler e gli oggetti hanno un'origine locale. Trovandosi soltanto a pochi milioni di anni luce, anziché a miliardi di anni luce, l'energia realmente emessa da tali oggetti sarebbe molto minore.

La difficoltà incontrata da tale ipotesi è che i quasar sono molto piú numerosi di quanto si poteva pensare all'inizio del 1960. Come abbiamo appena visto, calcoli recenti danno valori che si aggirano sul milione e, anche andando molto cauti, ben difficilmente si può supporre un numero minore del milione di quasar. Si può calcolare, sulla base dell'ipotesi Doppler-locale, che la massa di un quasar tipico dovrebbe esser almeno 10 000 volte quella del Sole. Per spiegare l'espulsione di milioni di oggetti, ciascuno di 10 000 masse solari, dal centro della nostra galassia, sarebbe necessario supporre che la massa di tutte le stelle del nucleo galattico si converta completamente in energia. Si deve poi anche spiegare perché gli unici quasar che siano mai stati osservati siano quelli espulsi dalla nostra galassia. Se qualche oggetto di tipo quasar fosse stato scagliato fuori da qualcuna delle galassie nelle nostre immediate vicinanze, avremmo dovuto osservarne qualcuno che si dirigeva *verso* di noi e che doveva presentare uno spostamento verso il blu anziché verso il rosso. Finora non sono stati osservati oggetti con uno spostamento verso il blu. L'ipotesi Doppler-locale va considerata perciò del tutto improbabile.

Un'altra spiegazione completamente differente del red-shift dei quasar sembrò all'inizio interessante. Secondo questa ipotesi i quasar sono oggetti con una massa considerevole compressa in un volume estremamente piccolo. La luce emessa da tali oggetti dovrebbe avere, per poter uscire, una enorme energia potenziale gravitazionale e verrebbe spostata verso il rosso proprio come

avviene nei quasar. È possibile stabilire con una notevole precisione le condizioni fisiche di cui tale ipotesi deve tener conto. È quindi possibile calcolare quanto debba essere grande lo strato di gas che emette la radiazione e quale debba essere la sua densità e la sua temperatura per produrre le righe spettrali che vengono effettivamente osservate nei quasar.

Ma se si fa l'ipotesi, per prendere un caso estremo, che la massa molto densa di tali oggetti sia dell'ordine della massa del Sole, l'inviluppo gassoso non presenterebbe la luminosità che è richiesta a meno di non essere in un raggio di 10 chilometri dall'osservatore! Naturalmente gli oggetti devono essere piú distanti e quindi è necessaria una massa piú grande. I valori trovati per le masse sono grandi e si creerebbero pertanto inammissibili effetti collaterali. Per esempio, alla distanza di 30 000 anni luce, la massa dovrebbe essere di 10^{11} masse solari; tale massa sarebbe circa pari a quella della nostra galassia, il cui centro si trova alla stessa distanza. Se si aumenta ancor piú la massa, fino a 2×10^{13} masse solari, bisogna portare la distanza minima a 10 milioni di anni luce. In tal caso, quando si ha a che fare con un milione di tali oggetti, per non dover aumentare la densità media dell'universo osservata sperimentalmente, bisogna supporre che essi siano distribuiti a distanze di almeno un miliardo di anni luce e a questo punto sarebbe piuttosto difficile classificarli come oggetti locali.

Si dovrebbe ancora ricordare, per completare il quadro, una altra ipotesi « anticosmologica »: l'ipotesi cioè che la causa del red-shift dei quasar sia semplicemente sconosciuta e sia completamente al di là della portata della fisica attuale. Poiché non si possono portare argomenti contro un'ipotesi metafisica di questo genere, non la possiamo escludere.

L'ipotesi cosmologica

Una delle maggiori attrattive dell'ipotesi cosmologica è che il red-shift dei quasar ne è una conseguenza naturale e non c'è bisogno di introdurre ipotesi strane per giustificarlo: i quasar hanno un red-shift per il semplice fatto di essere « trascinati » dall'espansione dell'universo. Inizialmente la maggior obiezione all'ipotesi cosmologica proveniva dalla straordinaria luminosità dei quasar e dalla loro variabilità a breve periodo. Negli ultimi cinque anni, però, sono state osservate fluttuazioni di luminosità a breve periodo e di notevole intensità anche nei nuclei di due tipi di galassie piuttosto « speciali »: le galassie di tipo N e le galassie Seyfert. Questi nuclei sono di tipo stellare e, dato che generano una quantità anormale di radiazione ultravioletta, assomigliano ai quasar; per di piú si pensa che i loro red-shift, anche se quelli delle galassie Seyfert sono modesti, siano di origine cosmologica.

Di recente si è scoperto che sia i quasar sia le galassie Seyfert hanno una intensa emissione nella zona infrarossa dello spettro. In effetti la luminosità nell'infrarosso della piú vicina radiogalassia Seyfert, 3C 120, è 10^{46} erg al secondo, che è uguale alla luminosità nell'infrarosso di molti quasar quando si calcoli la loro luminosità intrinseca nell'ipotesi che si trovino a distanze cosmologiche. In altre parole, siamo di fronte a oggetti la cui straordinaria emissione di energia è altrettanto difficilmente spiegabile di quella dei quasar (considerati oggetti cosmologici) e la cui emissione varia con periodi brevi quanto quelli dei quasar. Non è quindi possibile escludere l'ipotesi cosmologica basandosi sulle difficoltà incontrate nella spiegazione della rapida variazione della grande luminosità dei quasar, dato che le stesse difficoltà si presentano per le galassie, le cui caratteristiche e distanze non sono in discussione.

Di recente James E. Gunn, degli Osservatori Hale, ha ottenuto delle prove in favore dell'ipotesi cosmologica: Gunn ha infatti trovato che l'immagine del quasar PKS 2251 + 11 (red-shift 0,323) è sovrapposta all'immagine di un piccolo e compatto ammasso di galassie, ed è riuscito a determinare il red-shift della piú luminosa galassia dell'ammasso, trovando il valore $0{,}33 \pm \pm 0{,}01$. La coincidenza sia in direzione sia in red-shift rende molto probabile che il quasar sia associato all'ammasso di galassie, il che è una conferma della natura cosmologica del suo red-shift.

Per quanto riguarda la sorgente ultima dell'enorme energia osservata nei quasar, non sono le ipotesi che mancano: tra queste le collisioni stellari, il collasso gravitazionale di stelle di grande massa, le esplosioni di supernove, la conversione di energia gravitazionale in energia delle particelle tramite campi magnetici, l'annichilazione materia-antimateria e l'energia di rotazione di una massa molto compatta (come per i pulsar). Non c'è molto accordo neppure sul tipo del meccanismo di radiazione, in particolar modo nell'infrarosso, dove cioè viene irradiata la maggior parte dell'energia. Problemi analoghi si presentano per i nuclei delle galassie, in particolare per quelli delle galassie Seyfert. La soluzione di questi problemi costituisce una delle principali sfide per l'astronomia dei nostri giorni.

Il linguaggio chimico dei pesci

Molti pesci hanno organi olfattivi assai sensibili. Esperimenti compiuti su pesci gatto dimostrano che essi si servono di questo senso con intenti sociali, per esempio per distinguere i vincitori e i perdenti nei conflitti gerarchici

di John H. Todd

I pesci, di cui esistono attualmente circa 25 000 specie, non hanno rivali tra i vertebrati nella capacità di adattarsi a condizioni di vita avverse. Essi sono riusciti a penetrare e a stabilirsi in ambienti tra i piú duri e inospitali del globo. Nell'America meridionale e sull'Himalaya vivono pesci gatto che trascorrono tutta la loro esistenza appesi alle rocce a picco dei torrenti montani. L'anabate, il « persico arrampicatore » (*Perca scandens*) dell'oriente, abbandona di tanto in tanto l'ambiente acquatico per « passeggiare » sulla terraferma respirando aria, e riesce addirittura a salire sui rami piú bassi degli alberi in cerca di cibo. Il pesce « annuale » dell'Africa e dell'America meridionale, cosí chiamato perché la sua esistenza dura una sola stagione, compare regolarmente ogni anno in piccole pozze d'acqua che si formano durante la stagione delle piogge nelle regioni semiaride. Forse, tra tutti i pesci, i piú strani sono quelle bizzarre creature che vivono la loro intera esistenza nella notte perpetua delle profondità oceaniche. Il lato piú sorprendente è che questi animali, benché completamente ciechi o quasi, abbiano sviluppato un comportamento sociale elaborato, che gareggia per complessità con quello degli animali superiori.

Ciò si spiega col fatto che questi pesci hanno la possibilità di comunicare – esigenza primaria per una vita sociale – attraverso i loro sensi chimici. In molte specie i recettori del gusto e dell'olfatto e i centri cerebrali associati ad essi predominano come componenti sensoriali del sistema nervoso, sopraffacendo i lobi ottici. Si è visto che alcuni pesci possiedono una sensibilità chemosensoriale quasi incredibile. Harold Teichmann dell'Università di Giessen è riuscito a condizionare delle anguille a reagire a concentrazioni di alcool cosí diluite, da fargli pensare che i recettori olfattivi di questi animali fossero sensibili anche a poche molecole di questa sostanza.

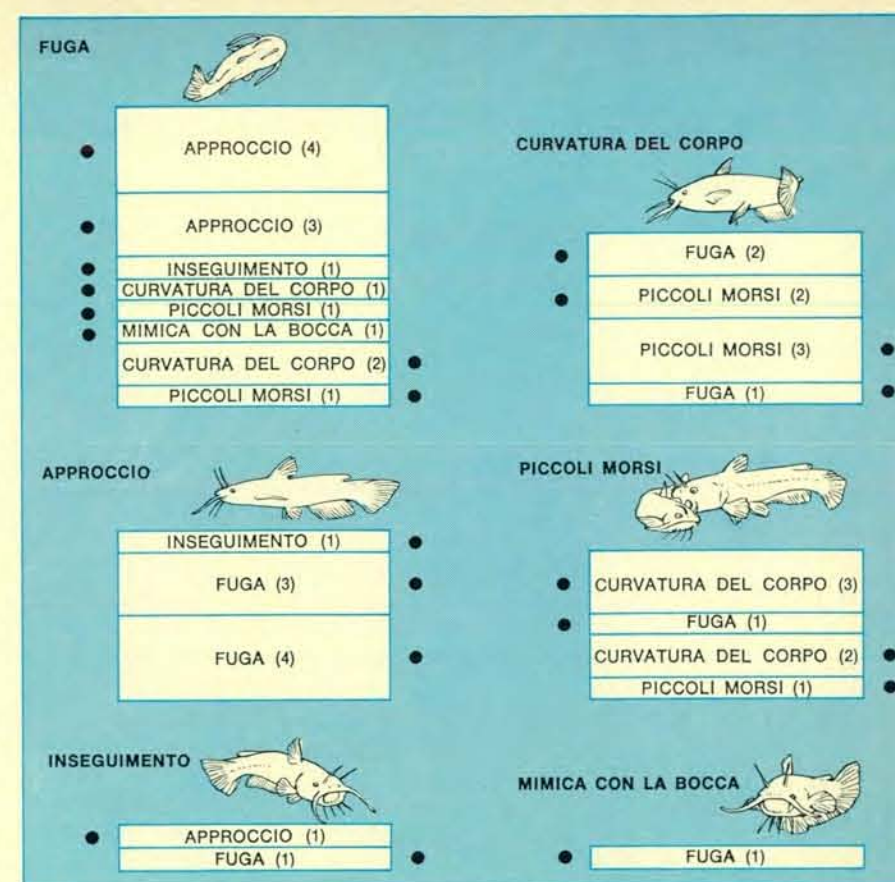
Sono stato indotto a indagare sul tema affascinante della comunicazione chimica tra i pesci da uno studio sul comportamento dei pesci gatto, iniziato presso l'Università del Michigan sotto la stimolante guida di John E. Bardach. Il pesce gatto, un animale prevalentemente notturno, ha una vista cattiva ma sensi dell'olfatto e del gusto estremamente sviluppati. Il suo organo olfattivo è quasi altrettanto sensibile di quello dell'anguilla e il suo corpo è interamente cosparso di centinaia di migliaia di bottoni gustativi. Molti anni fa, George Howard Parker, della Harvard University, aveva concluso, in base a studi condotti sul comportamento dei pesci gatto nei riguardi del cibo, che essi lo individuavano nell'acqua avvertendone la presenza a distanza con l'olfatto. Io ho ripetuto ed esteso le indagini di Parker e ho trovato che non è l'olfatto a condurre questi pesci in prossimità del cibo. In acque calme, pesci accecati e privati dei loro recettori olfattivi riuscivano ugualmente a dirigersi subito verso di esso. Fattore guida è risultata la capacità di riconoscimento dello stimolo chimico, proveniente dal cibo situato a distanza, da parte dei bottoni gustativi localizzati sul corpo dell'animale. Infatti un pesce, a cui erano stati distrutti chirurgicamente i bottoni gustativi su un lato del corpo, ebbe delle difficoltà nel trovare il cibo e vi riuscí soltanto incurvandosi in modo da esporre il lato dove i bottoni gustativi erano ancora intatti.

Fui assalito allora da un dubbio: se il notevole senso dell'olfatto del pesce gatto non gli serviva per trovare il cibo, quali funzioni esercitava? Ebbi la fortuna di trovare presto la soluzione: un giorno in cui avevo molto da fare mi trovai con un pesce in piú senza un acquario dove poterlo mettere da solo; lo introdussi allora in una vasca da circa 200 litri assieme a un pesce gatto cieco, che vi soggiornava da circa un mese. Immediatamente i due pesci diedero luogo a una frenetica attività, ergendo la coda l'uno contro l'altro con un tremito continuo, spalancando ferocemente la bocca e azzannandosi a vicenda. Fui costretto a togliere l'ultimo venuto per impedire che i due si danneggiassero gravemente.

I due pesci appartenevano alla stessa specie. Quando, in un secondo tempo, misi un pesce di specie diversa (ma all'incirca delle stesse dimensioni) nella stessa vasca di prima assieme al vecchio occupante, questi non lo assalí. Da ulteriori esperimenti emerse che il soggetto accecato si eccitava e diventava aggressivo quando veniva introdotta nella sua vasca l'acqua prelevata dall'acquario dove era stato posto il pesce con il quale aveva combattuto, mentre non lo diventava affatto quando si introduceva acqua proveniente da vasche in cui si trovavano specie diverse. Evidentemente esso riusciva a riconoscere la propria specie da qualche sostanza chimica dispersa nell'acqua. L'animale rispose in maniera sorprendente al successivo esperimento: quando fu introdotta nella sua vasca acqua di un acquario in cui era contenuto un pesce gatto della sua stessa specie, ma non esattamente quello con il quale aveva combattuto, esso girò attorno al punto dove era stata versata l'acqua per parecchi minuti ma senza attaccare e mostrando un interesse via via decrescente per quella zona. I risultati di questi esperimenti hanno fatto pensare che i segnali chimici ai quali il pesce aveva risposto portassero piú di un messaggio: il ricevente non solo era in grado di identificare un individuo della sua stessa specie, ma percepiva anche un segnale che gli permetteva di identificare l'intruso come rappresentante un certo tipo di minaccia. È chiaro che i pesci gatto, dotati di sensibilità chimica, devono usare questa loro dote per finalità diverse da quella della ricerca del cibo. L'aver scoperto questa loro caratteristica ispirò tutta una serie di indagini sulla comunicazione e sul comportamento sociale dei pesci, che ho effettuato con vari collaboratori all'Università del Michigan, al San Diego State College e, piú di recente, alla Woods Hole Oceanographic Institution.

Riferirò prima che cosa abbiamo appreso sul tipo piú banale di comunicazione: quello relativo al comportamento sessuale. Al San Diego State College, con la collaborazione di Jack Nelson, ho compiuto ampie indagini di laboratorio su quest'argomento operando con due specie di blennidi, piccoli pesci che abbondano nelle acque basse lungo la costa della California.

Nella zona erano già state effettuate alcune indagini pionieristiche. George MacGinitie dell'Istituto di Tecnologia della California aveva scoperto per primo, circa 35 anni fa, che i pesci – come gli insetti e qualche altro animale – si servono per comunicare di segnali chimici detti feromoni. Egli aveva esaminato la specie *Typhlogobius californiensis*, un piccolo ghiozzo che diventa cieco da giovane e trascorre la propria esistenza in un cunicolo scavato nel fango dal « gambero fantasma ». Il pesce, maschio o femmina che sia, è di una estrema aggressività nei riguardi dei membri del suo stesso sesso e tollera come coinquilino solo un membro dell'altro sesso. Il maschio e la femmina di *Typhlogobius californiensis* fanno coppia precocemente, ancor prima di esser sessualmente maturi, e di solito rimangono insieme per tutta la vita. Se un intruso invade la loro tana, quello dei due che ha lo stesso sesso dell'estraneo ingaggia con esso un feroce combattimento che generalmente si conclude con la morte dell'uno o dell'altro contendente. Se poi l'intruso sconfigge l'occupante della tana e si sostituisce a esso, viene accettato dall'altro occupante come se nulla fosse accaduto.

MacGinitie è riuscito a stabilire sperimentalmente che il ghiozzo riconosce il sesso di un membro della sua stessa specie mediante un segnale chimico. L'esperimento da lui attuato consistette nel mettere l'animale in un sacchetto, nel pungere quest'ultimo con uno spillo in modo da farne uscire un sottile filo d'acqua, e nell'introdurre, quindi, il tutto in un cunicolo occupato da una coppia di ghiozzi ciechi. Quando l'odore del pesce contenuto nel sacchetto raggiunse la coppia, quello dei due membri che aveva lo stesso sesso del pesce nel sacchetto, si avventò immediatamente contro di esso.

In questa registrazione di un incontro tra un pesce gatto subordinato e il suo rispettivo dominante, che vive nella stessa vasca, prevale la fuga; le azioni maggiormente aggressive consistono in alcuni morsi e in due inseguimenti. Quando due pesci hanno già interagito, le loro successive azioni sono limitate sia nel tipo che nel numero.

Il nostro lavoro sui blennidi fu suggerito dalle recenti scoperte di George Losey della Scripps Institution of Oceanography, il quale aveva dimostrato che un blennide maschio poteva essere stimolato verso il corteggiamento dopo essere stato messo in presenza di acqua prelevata da una vasca in cui una coppia di blennidi della stessa specie esibiva un'intensa attività di corteggiamento o di accoppiamento. La ricerca di Losey fece sorgere parecchi interrogativi interessanti per cui Nelson e io cominciammo a indagare sul comportamento sessuale di due specie del genere *Hypsoblennius* – la *H. jenkinsi* e la *H. gilberti* – che vivono nelle pozze d'acqua costiere in prossimità di La Jolla, sede della Scripps Institution. Ambedue le specie si riprodussero facilmente in vasche da laboratorio che simulavano il loro ambiente naturale: potemmo cosí analizzare i particolari del loro comportamento sessuale e parentale. Comportamento che risultò praticamente identico per le due specie: nella costruzione o selezione dei nidi, nelle parate di corteggiamento, nelle attività svolte durante la riproduzione e le cure parentali, fu notata, infatti, una scarsa diversità tra *H. jenkinsi* e *H. gilberti*. Anzi, quando cercammo di accoppiare una specie con l'altra, i maschi di *H. jenkinsi* mostrarono addirittura un certo interesse nel corteggiare le femmine dell'altra specie. Tuttavia questo corteggiamento non si concludeva con l'accoppiamento. Bisognava, inoltre, trovare una spiegazione al fatto che le due specie non si ibridassero in natura, pur vivendo nelle stesse pozze costiere. Le piccole differenze da noi osservate negli schemi d'azione non sono apparse sufficienti a giustificare l'isolamento delle specie tra loro. Evidentemente devono esservi segnali di un certo tipo che le differenziano e ne rendono impossibile l'incrocio.

Abbiamo cercato innanzitutto degli indizi su quanto fossero importanti gli

stimoli visivi, da soli, nel comportamento sessuale. Maschi e femmine vennero posti individualmente in recipienti di vetro chiusi in modo da escludere la trasmissione di qualsiasi tipo di stimolo che non fosse quello visivo. Furono ottenute risposte da ambo le parti. Nelle condizioni suddette, i maschi corteggiavano ancora le femmine e generalmente eseguivano mosse d'attacco nei riguardi dei maschi della loro stessa specie. Il piú delle volte, ogni specie ignorava i membri dell'altra specie, tranne nel caso dei maschi di *H. jenkinsi* che corteggiavano spesso anche le femmine di *H. gilberti* (*si veda la figura in basso a pag. 99*). A parte quest'unica eccezione, sembrò dunque che i blennidi fossero in grado di riconoscere visivamente il proprio sesso e la propria specie. Poiché le femmine, diversamente dai maschi, sono simili come dimensione e colorazione, non era forse troppo strano che i maschi di *H. jenkinsi* corteggiassero indiscriminatamente le femmine dell'una e dell'altra specie. Dovevano dunque essere probabilmente implicati segnali di altro tipo.

Procedemmo allora alla ricerca di segnali chimici. Il problema era complicato dal fatto che volevamo identificare i segnali del maschio e della femmina di ambedue le specie. Altri indizi avevano suggerito che i feromoni fossero prodotti soltanto dal maschio. Dopo parecchi mesi di lavoro, e un numero di sfortunati tentativi, Nelson riuscí finalmente a elaborare un metodo per raccogliere le sostanze chimiche emesse da un individuo dell'uno o dell'altro sesso e presentare questo materiale incontaminato a un animale cavia. Come animali cavia usammo maschi di *H. jenkinsi*, in quanto avevamo cosí la possibilità di trovare se essi erano guidati da un segnale chimico nella discriminazione di specie che erano incapaci di distinguere visivamente. Al maschio di *H. jenkinsi* fu mostrata innanzitutto una femmina della stessa specie, sessualmente recettiva, per vedere se avrebbe ingaggiato o no un certo corteggiamento. In caso positivo, lo si sarebbe sottoposto a un test per vedere le sue reazioni a quantità note (100 cm^3) di acqua proveniente da varie fonti – dalla vasca di una femmina di *H. jenkinsi* corteggiata da poco, dalla vasca di una femmina della stessa specie non corteggiata, da una vasca di un maschio della stessa specie in attività di corteggiamento, da una vasca di una femmina di *H. gilberti* corteggiata – o semplicemente di acqua di mare pura. I campioni non erano contaminati da acqua rimasta a contatto con il pesce del sesso opposto, cosa che fu possibile separando i due pesci durante il corteggiamento mediante una lastra di vetro posta all'interno della vasca. Per fortuna si poté determinare inequivocabilmente se la reazione del pesce era dovuta a un segnale chimico; esistono infatti nel blennide certi atteggiamenti di corteggiamento (lo « scatto della testa » e il « tremito ») che sono associati a una forte motivazione sessuale e che potrebbero essere scatenati soltanto dai feromoni.

In una percentuale elevata di test, risultò che i maschi di *H. jenkinsi* mostravano questo tipo di corteggiamento dopo essere stati in presenza di acqua nella quale aveva soggiornato una femmina della stessa specie che era stata oggetto di corteggiamento (non si era avuta alcuna stimolazione visiva). Essi reagivano, anche se molto meno spesso, ai maschi della stessa specie avvicinandosi all'acqua prelevata dalla vasca che ne conteneva uno. In presenza di acqua proveniente da una vasca di una femmina di *H. gilberti* o di acqua di mare pura, il maschio di *H. jenkinsi* non mostrò, tuttavia, alcuna reazione praticamente in tutti i casi.

Pertanto i risultati indicano che un feromone prodotto dalla femmina durante il corteggiamento è il segnale che distingue le due specie; la differenza tra le specie per questa segnalazione chimica impedisce la loro ibridazione sia in natura sia nei tentativi di incrocio compiuti in laboratorio.

Ritorniamo ora ai pesci gatto, poiché proprio con questi animali siamo riusciti ad acquisire qualche conoscenza sul complesso delle comunicazioni chimiche esistenti tra i pesci e sulla raffinatezza del loro linguaggio chimico. Utili soggetti per la nostra indagine sono state le due specie *Ictalurus natalis* e *Ictalurus nebulosus*, che vivono

Il comportamento sociale del pesce gatto può essere mite o feroce, con tutta una gamma intermedia di variazioni: alcuni atteggiamenti tipici sono illustrati nella pagina a fronte. La mimica della bocca varia molto come intensità: il tono dimesso (*a*) contrasta con atteggiamenti piú spinti (*per esempio b, a sinistra, e j*). Sia l'approccio (*c*) che la curvatura del corpo (*d*) compaiono in interazioni di varia intensità. D'intensità intermedia sono i colpi di coda (*e, in alto*), la parata laterale (*b, a destra*) e i piccoli morsi (*f*), tutte azioni comuni tra pesci di ugual censo. I colpi di testa (*g*), la lotta con la bocca (*h*), e l'azzannamento (*i*) sono azioni di maggiore intensità. Gli incontri tra pesci di tipo « territoriale » si concludono generalmente con un inseguimento (*j*), nel quale il pesce dominante funge da inseguitore e il pesce subalterno subisce l'attacco.

a b c d e f g h i j

APPROCCIO

CURVATURA DEL CORPO (1)
AZZANNAMENTO (1)
TREMITO (1)
LOTTA CON LA BOCCA (2)
INSEGUIMENTO (2)
FUGA (2)
MIMICA CON LA BOCCA (7)
LOTTA CON LA BOCCA (1)
INSEGUIMENTO (1)
FUGA (3)
PICCOLI MORSI (1)
PICCOLI MORSI (5)
MIMICA CON LA BOCCA (24)

MIMICA CON LA BOCCA

APPROCCIO (24)
AZZANNAMENTO (1)
TREMITO (1)
INSEGUIMENTO (4)
PICCOLI MORSI (6)
APPROCCIO (7)

PICCOLI MORSI

AZZANNAMENTO (1)
INSEGUIMENTO (1)
APPROCCIO (1)
APPROCCIO (5)
MIMICA CON LA BOCCA (6)
AZZANNAMENTO (1)
INSEGUIMENTO (1)
FUGA (1)

INSEGUIMENTO

PICCOLI MORSI (1)
LOTTA CON LA BOCCA (1)
APPROCCIO (1)
MIMICA CON LA BOCCA (4)
AZZANNAMENTO (1)
INSEGUIMENTO (1)
APPROCCIO (2)

FUGA

PICCOLI MORSI (1)
CURVATURA DEL CORPO (1)
APPROCCIO (3)
CURVATURA DEL CORPO (1)
LOTTA CON LA BOCCA (1)
APPROCCIO (2)

AZZANNAMENTO

INSEGUIMENTO (1)
PICCOLI MORSI (1)
MIMICA CON LA BOCCA (1)
APPROCCIO (1)
PICCOLI MORSI (1)
LOTTA CON LA BOCCA (2)

LOTTA CON LA BOCCA

APPROCCIO (1)
FUGA (1)
AZZANNAMENTO (2)
INSEGUIMENTO (1)
APPROCCIO (2)

CURVATURA DEL CORPO

FUGA (1)
FUGA (1)
APPROCCIO (1)

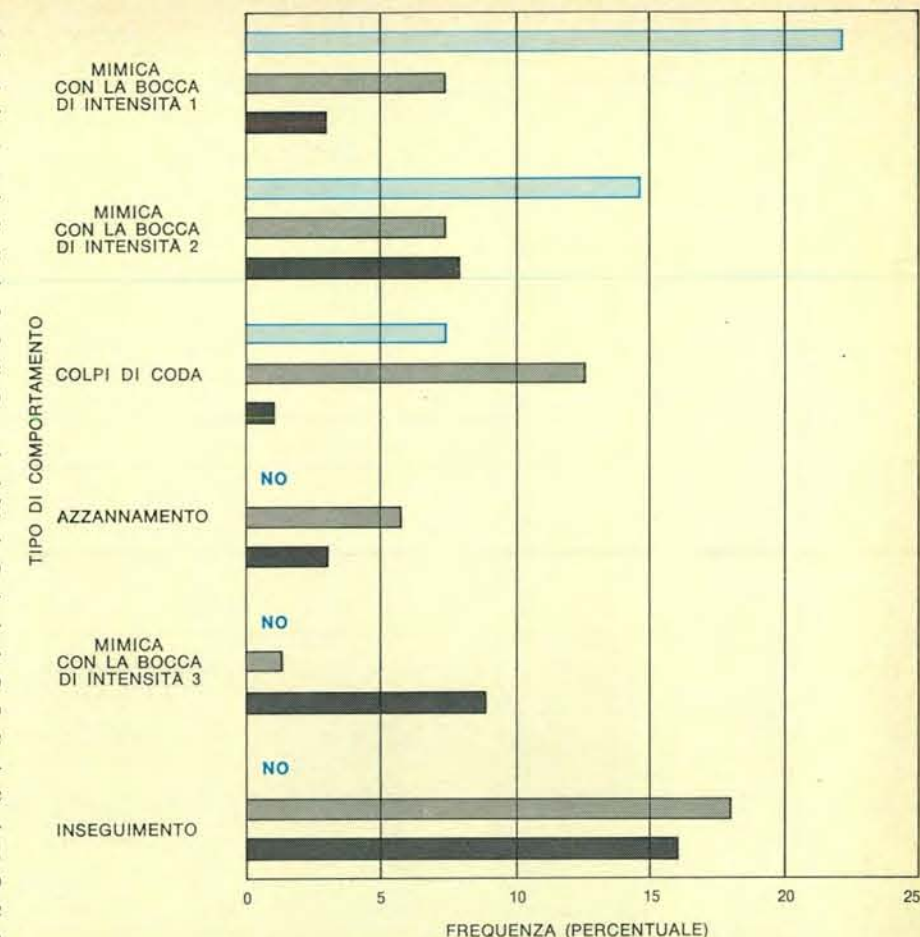
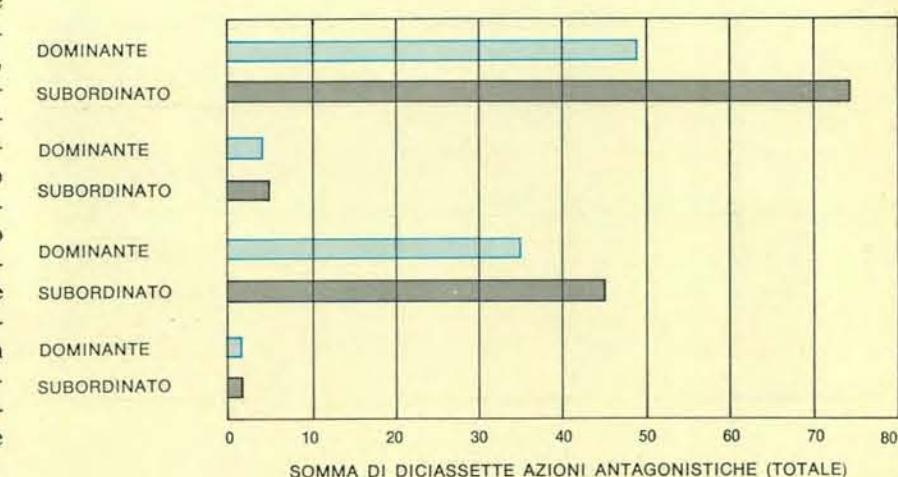
TREMITO

MIMICA CON LA BOCCA (1)
APPROCCIO (1)

Interazioni complesse sono caratteristiche degli scontri tra pesci gatto estranei. In questo schema ogni colonna rappresenta un tipo di azione, frequentemente ripetuta in un incontro prolungato da uno dei due contendenti. Le suddivisioni all'interno della colonna identificano le azioni precedenti o successive in base al tipo e alla frequenza; i pallini neri indicano se l'azione precedeva (*a sinistra*) o seguiva (*a destra*). La disposizione delle colonne è in ordine soltanto di grandezza; benché il piú delle volte l'approccio sia un atteggiamento iniziale, in questo schema non sono rappresentate le sequenze temporali.

comunemente in piccoli laghi e stagni degli Stati Uniti orientali e sono ricercati dai ragazzi che li pescano con la lenza. I pesci gatto possono rappresentare il vertice nell'evoluzione dei sensi chimici dell'ittiofauna. I loro organi del gusto e dell'olfatto sono molto sviluppati, parimenti alle aree encefaliche interessate alle stesse funzioni, mentre le facoltà visive sono ridotte o, in alcuni casi, addirittura assenti. Il nostro presupposto che i pesci gatto fossero gli animali ideali per un'indagine sulle comunicazioni si è dunque dimostrato ben fondato.

A Michigan, Jelle Atema, un neurologo ricco di intuizioni che si interessava a studi sul comportamento, si uní a me nelle ricerche sul comportamento dei pesci gatto e, nell'allestimento di esperimenti controllati sulle comunicazioni, trascorremmo vari mesi osservando le interazioni sociali di tali soggetti. Un aspetto interessante del loro comportamento è che essi eleggono comunemente un proprio territorio che difendono dagli intrusi. Nell'habitat naturale di uno stagno o di un lago, tale territorio può essere un buco lungo l'argine, o lo spazio sotto un pezzo di legno sommerso, o un cunicolo scavato nel fondale soffice. Anche nelle vasche di laboratorio i pesci gatto cercarono di costituirsi un territorio; magari rappresentato soltanto da una zona d'acqua nettamente delimitata. Quando in una vasca venivano introdotti due pesci, ciascuno stava nel proprio territorio, facendo rapidamente dietrofront quando ne raggiungeva i limiti. Se uno dei due soggetti veniva allontanato, per diverse ore l'altro non osava invadere il territorio vacante. Tuttavia se in questo veniva introdotto un pesce estraneo, subito lo raggiungeva e lo attaccava. D'altra parte, quando il nuovo venuto veniva allontanato e al suo posto tornava il primo occupante, l'altro ricominciava a rispettare il vecchio confine. Questo comportamento ha fatto pensare che un pesce gatto non soltanto è in grado di identificare ma anche di ricordare l'identificazione di un particolare individuo; in questo caso un individuo che, come l'esperienza ha dimostrato, non contesterebbe il suo territorio e gli lascerebbe godere in pace la sua esistenza.

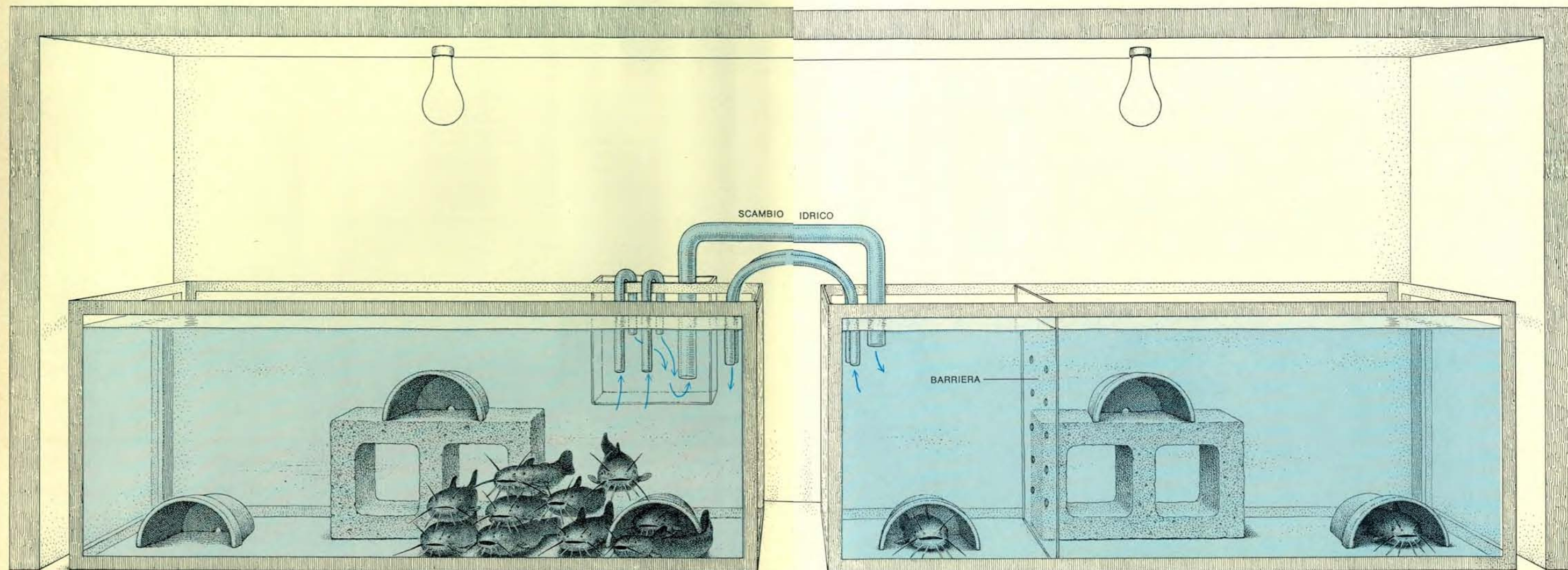
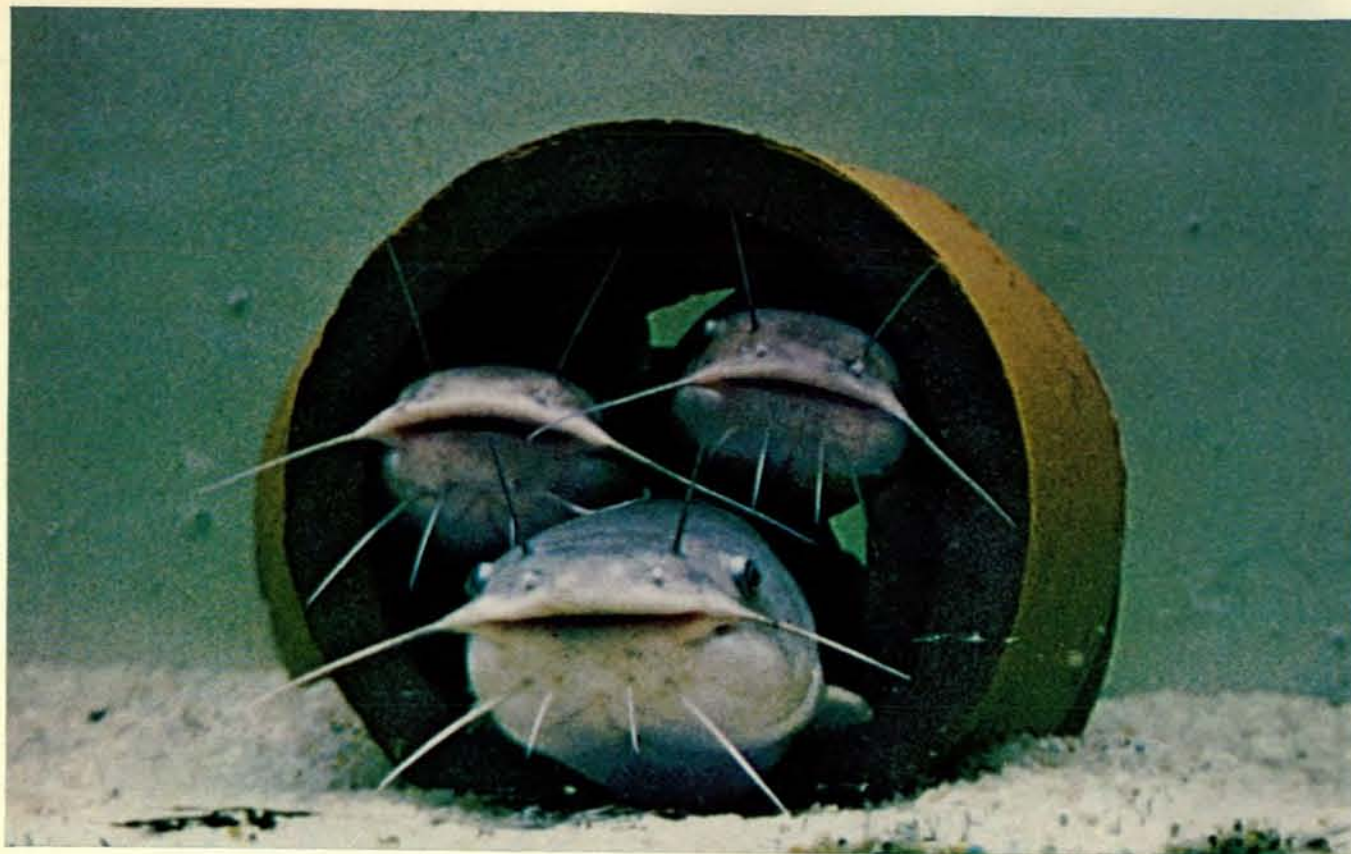
Abbiamo trovato che le femmine, tranne durante la stagione degli amori, occupano, come i maschi, territori individuali. Nelle vasche contenenti un certo numero di individui, si stabilisce generalmente una gerarchia. Un pesce, dominando gli altri, eleggerebbe l'area piú grande e piú protetta come proprio territorio, mentre quelli di grado

Sei diverse azioni agonistiche si svolgono tra i pesci gatto, con diversa frequenza in disuguali condizioni di vita. Due atteggiamenti relativamente non aggressivi sono, per esempio, le mimiche boccali di primo e di secondo grado di intensità. In queste categorie, i pesci di comunità pacifiche (*in colore*) superano i membri dominante (*in grigio*) e subordinato (*in nero*) di una coppia di tipo territoriale. Tuttavia, i pesci di tipo territoriale sono attivi in categorie agonistiche, quali l'azzannamento e l'inseguimento. Questo comportamento non si osserva in gruppi comunitari. I pesci territoriali si impegnano in un numero d'interazioni tre volte superiore a quello dei pesci comunitari.

Effetto del feromone antiaggressione su due pesci gatto isolati. La lunghezza di ogni rettangolo indica il numero di eventi agonistici verificatisi in una qualsiasi delle diciassette categorie comportamentali, registrate durante periodi di osservazione di otto ore. I rettangoli in grigio rappresentano il comportamento del pesce subordinato e quelli in colore il comportamento del pesce dominante. All'inizio (*in alto*), i due pesci non ricevevano acqua dalla vasca adiacente, contenente la comunità di pesci (*si veda l'illustrazione nelle due pagine seguenti*). I rettangoli del secondo gruppo dall'alto registrano le azioni dei due pesci dopo un'esposizione di sette giorni al feromone. Quelli del terzo gruppo il risultato dopo una sospensione di 24 ore nella somministrazione e, infine, gli ultimi il risultato di una nuova somministrazione di 24 ore.

inferiore occuperebbero aree piú piccole e piú esposte. Un'analisi particolareggiata ha dimostrato che i conflitti tra pesci gatto assumono forme svariate a seconda del grado gerarchico relativo dei contendenti. In un confronto tra due membri della comunità, dotati di un uguale censo, essi assumono semplicemente un atteggiamento di danza, spalancando la bocca in maniera aggressiva, facendo atto di mordere e avvicinandosi e allontanandosi alternativamente. Nel caso di un membro dominante e di un membro subordinato, l'azione consiste principalmente in una fuga da parte del secondo e in un inseguimento da parte del primo. Solo in un conflitto tra due estranei il combattimento diventa davvero violento; questa lotta è caratterizzata da una varietà di atti aggressivi, feroci azzannamenti e, alla fine, morte per uno dei due contendenti. Si è notato però che anche nel caso di lotte non letali il fatto di aver perduto può sfociare in gravi conseguenze per il perdente, a parte le ferite corporee e la perdita del territorio. Dopo la lotta, il perdente spesso non riusciva piú a crescere normalmente anche se adeguatamente alimentato e mantenuto in una propria vasca. Il pesce sopraffatto rimaneva striminzito e dopo pochi mesi si sarebbe potuto difficilmente credere che vincitore e vinto avevano all'origine dimensioni simili.

Anche se la maggior parte delle interazioni tra pesci gatto sono di tipo aggressivo, essi possono esibire talvolta un comportamento cooperativo. Quando in una piccola comunità costituita da pochi pesci viene introdotto un estraneo, il membro dominante fa entrare gli altri membri subordinati nel suo territorio e se li fa salire sul dorso per proteggerli; dopo di che si fa avanti e affronta l'intruso in combattimento. Una volta, quando un estraneo si introdusse nel territorio del « boss » assieme a un subordinato di quest'ultimo, il boss lo sfrattò, ignorando per il momento il suo subalterno; tuttavia, dopo che ebbe sconfitto il primo, buttò fuori anche il secondo.

Il comportamento e la capacità di riconoscimento dei pesci dipende in apparenza molto poco dalla vista. Il comportamento di alcuni soggetti tenuti in laboratorio non si modificò infatti in misura sensibile dopo che essi furono accecati (la condizione di cecità è predominante in natura in alcune popolazioni). Per i pesci gatto prevalgono le stimolazioni di ordine chimico e la loro memoria nel riconoscerle è fenomenale. Un unico esempio sarà sufficiente per illustrare questo punto. Poco dopo aver immesso parecchi piccoli pesci in una vasca, capitò che un pesce grosso saltasse in essa da una vasca vicina, cominciando a ledere gravemente gli esemplari piú piccoli. Tutti tranne due riuscirono a sfuggire dal contenitore cadendo sul pavimento e morendo, cosicché quando l'intruso fu tolto dalla vasca rimasero solo due sopravvissuti. Questi elessero i loro rispettivi territori ai due estremi della vasca. Per saggiare la loro reazione a una stimolazione di ordine chimico, versammo un poco di acqua prelevata dal recipiente in cui era contenuto il pesce che li aveva assaliti. I due soggetti, senza tener piú conto della territorialità, corsero a nascondersi insieme, ritornando ciascuno al proprio territorio e riparo solo dopo che il segnale di pericolo era scomparso. Benché il pesce che li aveva terrorizzati non fosse entrato mai nella loro vasca, per quattro mesi essi continuarono a scappare e a nascondersi ogni volta che venivano posti in presenza dell'acqua che era stata a contatto con il responsabile di quella solitaria aggressione. La memoria del segnale chimico che serviva a identificare il loro attaccante era dunque rimasta ben impressa in questi animali. Essi non diedero risposte dello stesso calibro ad acque provenienti da vasche di altri pesci.

A questo punto della nostra ricerca, ci sforzammo di verificare l'esistenza di « etichette » chimiche individuali nei pesci in esame e di trovare la fonte organica dei feromoni di identificazione. Il nostro primo esperimento fu studiato in modo da poter saggiare la capacità del pesce di discriminare tra i segnali provenienti da due pesci gatto. Uno di questi era uno stimolo positivo, con l'offerta di una ricompensa in cibo per aver dato la risposta giusta, l'altro costituiva invece uno stimolo negativo, e la risposta sbagliata avrebbe provocato una scossa elettrica. Il pesce da sottoporre al test fu introdotto in una piccola vasca contenente un riparo rappresentato da un vaso da fiori tagliato a metà per il lungo e poggiato sulla parte piatta. Nella vasca fu versato un piccolo quantitativo d'acqua proveniente dal contenitore di uno dei due individui da discriminare. Quando questo individuo era il soggetto « positivo », il pesce in esame riceveva la ricompensa sotto forma di cibo se saliva alla superficie della vasca, sollevava la testa fuori dall'acqua e apriva la bocca nello spazio di cinque secondi dopo aver avvertito il segnale chimico. Quando l'individuo dalla cui vasca si prelevava l'acqua era, invece, il soggetto « negativo », il pesce doveva rintanarsi nel suo riparo entro cinque secondi dall'aver avvertito il segnale chimico, cosí da evitare la scossa elettrica emessa nella vasca tra due elettrodi d'argento.

I pesci sottoposti al test distinsero prontamente un segnale chimico dall'altro e, dopo circa 25 prove di addestra-

Una coppia di vasche ha rappresentato l'apparecchiatura necessaria per poter stabilire se il comportamento tranquillo dei pesci gatto quando sono riuniti in gruppi dipende o no dalla secrezione di un feromone antiaggressione. Una comunità di dieci individui è stata introdotta in una vasca (*a sinistra*); due pesci gatto, con un'aggressività normale, separati da una barriera, sono stati messi nella vasca di destra (*pagina a fronte*). L'acqua ha potuto essere travasata da una vasca all'altra (*come indicano le frecce*). L'allontanamento della barriera ha incitato i pesci isolati a un'azione aggressiva; gli sperimentatori hanno pompato quindi acqua contenente la misteriosa sostanza antiaggressione dalla vasca del gruppo comunitario in quella dei due contendenti. Brevi periodi di esposizione non ne hanno intaccato il comportamento aggressivo, ma dopo sette giorni consecutivi il loro comportamento agonistico era sostanzialmente scomparso. Brevi riesposizioni avevano lo stesso effetto.

Tre pesci gatto occupano una sezione di tubo sul fondo di un acquario. Il piú grosso dei tre, sul fondo del tubo, viene riconosciuto dagli altri due come dominante e generalmente è il solo a occupare il rifugio. Qui, tuttavia, i due subordinati, dopo aver avvertito l'odore di un pesce estraneo, hanno anch'essi cercato riparo nel tubo fiduciosi nella protezione del capo.

L'avvicinarsi di un pesce estraneo induce una risposta aggressiva da parte del pesce dominante, come risulta dalla sua bocca spalancata. Spesso esso attacca l'intruso, mentre i suoi coinquilini, con le bocche pacificamente chiuse, rimangono nel rifugio.

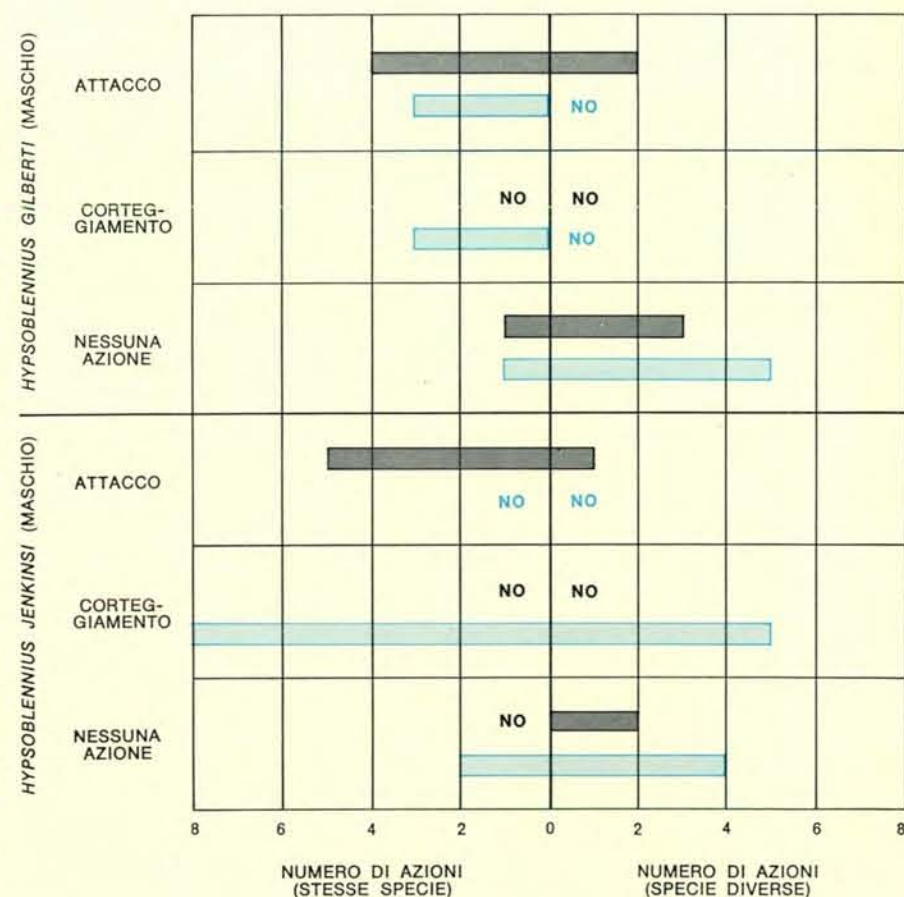
mento, furono in grado di rispondere correttamente nel 93 % dei casi (su un totale di 937 risposte per 10 pesci esaminati). Tutti i soggetti conservarono la discriminazione appresa per almeno tre settimane senza che fosse necessario ripetere l'addestramento. Parecchi animali svilupparono una reazione interessante allo stimolo negativo: prima di precipitarsi nel rifugio, si servirono dei loro cinque secondi di grazia per attaccare lo stimolo con una mimica della bocca e un tremito pieni di ostilità.

Per determinare se la segnalazione chimica era stata avvertita dal senso dell'olfatto o da quello del gusto, abbiamo distrutto i recettori olfattivi in alcuni soggetti. È risultato che questi non erano piú capaci di distinguere un segnale dall'altro, indipendentemente dal periodo di addestramento a cui erano stati sottoposti. La comunicazione mediante segnali chimici, nei pesci gatto, avviene quindi chiaramente attraverso il senso dell'olfatto. Ciò dà credito alla nostra ipotesi secondo cui questi animali si servono di due diversi canali: i bottoni gustativi per trovare il cibo e l'organo dell'olfatto per ricevere le comunicazioni di ordine sociale.

Per continuare a studiare l'importanza dell'olfatto nel controllo del comportamento sociale di questi pesci, abbiamo costituito una comunità consistente esclusivamente di soggetti privati dei tessuti olfattivi. Questi si comportarono tutti come se fossero stati estranei gli uni agli altri. Non formavano territori reciprocamente rispettati, si impegnavano in terribili lotte frontali che duravano anche per una ventina di minuti, non fuggivano quando erano sconfitti, ma si rigiravano e attaccavano di nuovo l'antagonista, mantenendo per settimane un comportamento aggressivo. Solo dopo che i tessuti olfattivi si erano rigenerati, essi tornavano a comportarsi come membri di una comunità non belligerante. Trovammo anche che, quando un pesce privato dell'organo olfattivo veniva introdotto in una comunità normale, esso non riusciva ad adattarsi malgrado le ripetute sconfitte, e non mostrava alcun segno che gli si stesse sviluppando una capacità di riconoscimento degli individui che erano presenti nella vasca e una consapevolezza della struttura sociale della comunità in cui era stato immesso. Risultò evidente cosí che la comunicazione necessaria per la formazione e il mantenimento di una comunità stabile dipende interamente dal senso dell'olfatto dei suoi componenti.

In un ambiente naturale, i pesci gatto formano spesso una densa comunità composta da centinaia di individui, basata non su una gerarchia o su un insieme di singoli territori, ma su una stretta collettività, con i singoli membri che nuotano liberamente e tranquillamente in su e in giú nello stagno che li ospita. Abbiamo potuto riprodurre in laboratorio una simile comunità, semplicemente introducendo un grosso numero di pesci gatto appena pescati in una vasca.

Tali soggetti rimasero per la maggior parte del tempo in stretto contatto, in « perfetto amore », diventando aggressivi solo se allontanati da quella comunità, isolati per parecchie settimane, e quindi introdotti in una comunità poco densa.

Con William McLarney, un esperto di ecologia del comportamento, e Mark Paule, un laureando, ho cercato di scoprire la possibilità che l'instaurarsi di un tipo di comunità numerosa e pacifica sia controllato da un fattore chimico specifico. Innanzitutto abbiamo confrontato lo schema tipico di comportamento dei gruppi comunitari, quale quello sopra citato, con lo schema caratteristico di pesci gatto appartenenti a comunità poco numerose in cui si stabiliscono tanti singoli territori. I pesci di tipo « comunitario », effettuavano pochissimi atti aggressivi, indulgendo soltanto in lievi manifestazioni come colpi di testa e mimiche non molto minacciose con la bocca. Avvicinammo quindi due vasche identiche, fianco a fianco, una contenente dieci pesci gatto di tipo comunitario, l'altra una coppia di pesci ciascuno col proprio territorio; un dispositivo permetteva di pompare l'acqua dalla prima vasca nella seconda. I due pesci di tipo « territoriale » (un dominante e un subordinato) sarebbero stati lasciati interagire in forma aggressiva (mettendo una paratia di vetro per tenerli separati) e quindi nella loro vasca sarebbe stata versata acqua dalla vasca contenente i pesci di tipo comunitario. Se questi ultimi emettevano una sostanza antiaggressione, una specie di « filtro

L'isolamento sessuale di due specie di blennidi, che vivono ambedue nelle acque costiere della California, dipende da stimolazioni diverse da quelle visive. Il grafico registra la risposta di un maschio di ciascuna specie alla vista di altri maschi (*in grigio*) e di femmine (*in colore*), della stessa specie o della specie diversa, isolati in recipienti chiusi e messi in una vasca assieme ai soggetti da esaminare. I maschi di *H. gilberti* hanno attaccato i maschi di ambedue le specie e corteggiato soltanto le femmine della propria. I maschi di *H. jenkinsi*, invece, hanno corteggiato le femmine di ambedue le specie.

d'amore », la ricezione di questo segnale avrebbe dovuto servire a calmare l'aggressività dei primi pesci.

Il nostro primo tentativo, in cui i pesci di tipo territoriale venivano esposti per un'ora a un flusso di acqua proveniente dai pesci di tipo comunitario, non produsse affatto le sperate inibizioni; anzi i soggetti mostravano un leggero aumento di intensità nella maggior parte dei loro atti aggressivi. Continuando tuttavia il trattamento, alla fine del settimo giorno, essi desistettero di colpo, e quasi completamente, dal loro comportamento aggressivo. Rimessi insieme, i due pesci si comportarono come pesci di tipo comunitario. L'immissione di acqua proveniente dai pesci comunitari fu quindi sospesa per un giorno e, nello spazio di 24 ore, comparve nuovamente un elevato grado di aggressività. Venne ripetuto il trattamento con acqua di pesci di tipo comunitario e questa volta non sette, ma un solo giorno di esposizione, fu sufficiente a sopprimere l'aggressività.

Sembra cosí che l'aggregarsi dei pesci gatto in fitte comunità produca una concentrazione di feromone che agisce inibendo l'aggressività. I risultati sperimentali fanno pensare che qualche parte dell'encefalo di questi pesci necessiti di essere « marcata » con una certa quantità di sostanza prima che questa possa fare effetto. Non è chiaro quali benefici tragga il pesce, per la sua sopravvivenza, da questo curioso sistema basato su due tipi di società: territoriale e comunitaria. Forse le associazioni di tipo comunitario costituiscono una riserva per rifornire le popolazioni di tipo territoriale. Studi in natura potranno fare un poco di luce su questo argomento.

Quali sono le fonti e la natura dei segnali chimici – l'alfabeto – del linguaggio dei pesci gatto? Sono state trovate alcune soluzioni. Risulta che l'odore del muco presente sulla cute del pesce è sufficiente a un soggetto per identificare un altro soggetto della stessa specie. Tuttavia la spiegazione non può essere tutta qui in quanto l'acqua in cui è stato immerso il pesce provoca una risposta piú intensa, il che fa pensare che siano interessate altre sostanze. L'odore delle secrezioni prodotte dalle gonadi serve forse per identificare il sesso del pesce. Anche l'urina può portare informazioni utili all'identificazione, anche se le prove da noi effettuate su questo materiale mostrano che, da solo, esso non dà sufficienti indicazioni per riconoscere un individuo. Può darsi che prodotti presenti nell'urina, indicanti lo stato di stress del pesce, riescano a segnalare se, nella comunità a cui appartiene, esso è dominante oppure subordinato.

Abbiamo compiuto alcuni esperimenti sul problema del riconoscimento del censo di un pesce gatto. Quando un pesce dominante viene allontanato dalla comunità, assoggettato fino alla disfatta a un pesce che usiamo come « giustiziere » e quindi rimesso nel gruppo di pesci che un tempo dominava, questi ultimi non scappano piú. Il pesce sconfitto deve aver evidentemente subito un cambiamento chimico. Per determinare se questo cambiamento altera l'identità del pesce come individuo o semplicemente informa gli altri pesci del cambiamento avvenuto nel suo stato, abbiamo applicato il test a una coppia di pesci gatto, uno dominante e uno subordinato, che avevano occupato la stessa vasca. Quando l'antico membro dominante fu rimesso nella vasca dopo la sconfitta, il compagno che originariamente gli era subordinato, cominciò ad attaccarlo. In questo comportamento, tuttavia, non comparivano gli atteggiamenti usati di solito contro un estraneo (per esempio la mimica aggressiva con la bocca e l'azzannamento) ma essi si limitavano alle manifestazioni mostrate verso individui noti. In breve l'attaccante sembrava riconoscere l'individuo rimesso nella vasca e ne individuava anche il cambiamento di stato.

Siamo ancora ben lontani dal riuscire a decifrare il linguaggio chimico dei pesci gatto. Esso è probabilmente complesso e in grado di comunicare informazioni circa la specie dell'individuo, le sue condizioni, il sesso, l'età o le dimensioni, lo stato riproduttivo, le caratteristiche individuali e forse perfino l'identificazione familiare. Senza dubbio i feromoni sono un mezzo di comunicazione tra genitori e prole. Si hanno anche alcune prove che esista un certo tipo di comunicazione chimica tra una specie e l'altra.

David Boylan, che collabora con noi in un programma di ricerca presso la Woods Hole Oceanographic Institution, sta cercando assieme a vari chimici di identificare le sostanze che formano il linguaggio dei pesci. In un futuro non troppo lontano queste potrebbero essere usate nell'itticoltura marina come attrattivi selettivi, esche artificiali, stimolanti di crescita, inibitori di aggressione e di cannibalismo, repellenti per allontanare i predatori dai pesci d'allevamento, potendo essere cosí ancora piú utili dei feromoni d'insetti, usati nel controllo degli agenti infestanti e patogeni in agricoltura.

d'amore », la ricezione di questo segnale avrebbe dovuto servire a calmare l'aggressività dei primi pesci.

Il nostro primo tentativo, in cui i pesci di tipo territoriale venivano esposti per un'ora a un flusso di acqua proveniente dai pesci di tipo comunitario, non produsse affatto le sperate inibizioni; anzi i soggetti mostravano un leggero aumento di intensità nella maggior parte dei loro atti aggressivi. Continuando tuttavia il trattamento, alla fine del settimo giorno, essi desistettero di colpo, e quasi completamente, dal loro comportamento aggressivo. Rimessi insieme, i due pesci si comportarono come pesci di tipo comunitario. L'immissione di acqua proveniente dai pesci comunitari fu quindi sospesa per un giorno e, nello spazio di 24 ore, comparve nuovamente un elevato grado di aggressività. Venne ripetuto il trattamento con acqua di pesci di tipo comunitario e questa volta non sette, ma un solo giorno di esposizione, fu sufficiente a sopprimere l'aggressività.

Sembra cosí che l'aggregarsi dei pesci gatto in fitte comunità produca una concentrazione di feromone che agisce inibendo l'aggressività. I risultati sperimentali fanno pensare che qualche parte dell'encefalo di questi pesci necessiti di essere « marcata » con una certa quantità di sostanza prima che questa possa fare effetto. Non è chiaro quali benefici tragga il pesce, per la sua sopravvivenza, da questo curioso sistema basato su due tipi di società: territoriale e comunitaria. Forse le associazioni di tipo comunitario costituiscono una riserva per rifornire le popolazioni di tipo territoriale. Studi in natura potranno fare un poco di luce su questo argomento.

Quali sono le fonti e la natura dei segnali chimici – l'alfabeto – del linguaggio dei pesci gatto? Sono state trovate alcune soluzioni. Risulta che l'odore del muco presente sulla cute del pesce è sufficiente a un soggetto per identificare un altro soggetto della stessa specie. Tuttavia la spiegazione non può essere tutta qui in quanto l'acqua in cui è stato immerso il pesce provoca una risposta piú intensa, il che fa pensare che siano interessate altre sostanze. L'odore delle secrezioni prodotte dalle gonadi serve forse per identificare il sesso del pesce. Anche l'urina può portare informazioni utili all'identificazione, anche se le prove da noi effettuate su questo materiale mostrano che, da solo, esso non dà sufficienti indicazioni per riconoscere un individuo. Può darsi che prodotti presenti nell'urina, indicanti lo stato di stress del pesce, riescano a segnalare se, nella comunità a cui appartiene, esso è dominante oppure subordinato.

Abbiamo compiuto alcuni esperimenti sul problema del riconoscimento del censo di un pesce gatto. Quando un pesce dominante viene allontanato dalla comunità, assoggettato fino alla disfatta a un pesce che usiamo come « giustiziere » e quindi rimesso nel gruppo di pesci che un tempo dominava, questi ultimi non scappano piú. Il pesce sconfitto deve aver evidentemente subito un cambiamento chimico. Per determinare se questo cambiamento altera l'identità del pesce come individuo o semplicemente informa gli altri pesci del cambiamento avvenuto nel suo stato, abbiamo applicato il test a una coppia di pesci gatto, uno dominante e uno subordinato, che avevano occupato la stessa vasca. Quando l'antico membro dominante fu rimesso nella vasca dopo la sconfitta, il compagno che originariamente gli era subordinato, cominciò ad attaccarlo. In questo comportamento, tuttavia, non comparivano gli atteggiamenti usati di solito contro un estraneo (per esempio la mimica aggressiva con la bocca e l'azzannamento) ma essi si limitavano alle manifestazioni mostrate verso individui noti. In breve l'attaccante sembrava riconoscere l'individuo rimesso nella vasca e ne individuava anche il cambiamento di stato.

Siamo ancora ben lontani dal riuscire a decifrare il linguaggio chimico dei pesci gatto. Esso è probabilmente complesso e in grado di comunicare informazioni circa la specie dell'individuo, le sue condizioni, il sesso, l'età o le dimensioni, lo stato riproduttivo, le caratteristiche individuali e forse perfino l'identificazione familiare. Senza dubbio i feromoni sono un mezzo di comunicazione tra genitori e prole. Si hanno anche alcune prove che esista un certo tipo di comunicazione chimica tra una specie e l'altra.

David Boylan, che collabora con noi in un programma di ricerca presso la Woods Hole Oceanographic Institution, sta cercando assieme a vari chimici di identificare le sostanze che formano il linguaggio dei pesci. In un futuro non troppo lontano queste potrebbero essere usate nell'itticoltura marina come attrattivi selettivi, esche artificiali, stimolanti di crescita, inibitori di aggressione e di cannibalismo, repellenti per allontanare i predatori dai pesci d'allevamento, potendo essere cosí ancora piú utili dei feromoni d'insetti, usati nel controllo degli agenti infestanti e patogeni in agricoltura.

GIOCHI MATEMATICI

di *Martin Gardner*

Numeri ciclici e loro proprietà

Tutti coloro che coltivano come hobby la teoria dei numeri probabilmente riconosceranno subito come familiare il numero 142 857, uno tra i piú notevoli numeri interi. A parte 1, che rappresenta il caso piú banale, esso è il piú piccolo « numero ciclico ». Un numero ciclico è un intero di n cifre con una proprietà abbastanza inconsueta: per qualunque numero compreso tra 1 e n venga moltiplicato dà un prodotto che contiene le stesse n cifre del numero originario disposte nello stesso ordine ciclico. Si pensi di congiungere la prima e l'ultima cifra di 142 857 in modo da formare una catena chiusa. Questa si può poi riaprire in sei punti formando cosí sei numeri di sei cifre, che costituiscono le sei permutazioni cicliche delle cifre originali.

1 × 142 857 = 142 857
2 × 142 857 = 285 714
3 × 142 857 = 428 571
4 × 142 857 = 571 428
5 × 142 857 = 714 285
6 × 142 857 = 857 142

La natura ciclica di questi sei prodotti ha affascinato moltissimo gli « stregoni » e molti trucchi di previsione matematica si fondano su questa proprietà. Eccone uno.

Preparate un mazzo di carte da gioco ed estraete tutte le carte di picche dall'uno al nove, ponetele in fondo al mazzo nel seguente ordine: 1, 4, 2, 8, 5, 7, dal basso in alto, con le tre rimanenti disposte a caso dopo queste. A questo punto potete dichiarare di essere in grado di ottenere alla fine del gioco il numero 142 857, numero che è già scritto in grosse cifre su una striscia di carta lunga due volte la busta in cui verrà inserita. Incollate gli estremi della striscia in modo da ottenere un anello chiuso con le cifre rivolte verso l'esterno, schiacciate poi l'anello come mostra la figura della pagina seguente. Mettete la striscia cosí appiattita nella busta, come si vede in figura.

Naturalmente dovete prima imparare a memoria il numero 142 857, e dovete anche ricordare che le prime tre cifre sono sulla parte superiore della striscia e le altre tre sulla parte inferiore. In seguito aprirete la busta tagliandola in uno dei quattro punti contrassegnati in figura dalle lettere A, B, C e D. Se taglierete in A o in D, anche l'anello verrà aperto in uno dei suoi estremi in modo che, una volta estratto dalla busta e aperto, risulterà una striscia che porta stampato il numero 142 857 o 857 142. Le altre quattro permutazioni si ottengono tagliando la busta nei punti B e C. (Cominciate a tagliare solo la busta, al di sotto della striscia; per continuare il taglio assicuratevi che le forbici taglino solo la parte superiore della busta e la parte superiore dell'anello). In questo modo si ottengono le permutazioni 428 751 e 285 714. Per le altre due basta girare la busta e seguire lo stesso procedimento dall'altra parte. Questo modo di aprire la busta e di estrarne una striscia contenente le sei permutazioni cicliche di 142 857 si basa su un procedimento seguito da Samuel Schwartz, un avvocato di New York, cultore di giochi magici. Egli usa di solito una busta a finestra cosí che gli spettatori possano scorgere le cifre scritte sul foglio, poi prepara e esegue il gioco in modo leggermente diverso, ma il metodo è praticamente lo stesso.

La busta chiusa contenente la vostra previsione viene consegnata a qualcuno all'inizio del gioco di prestigio. Consegnate poi a un'altra persona il mazzo cosí preparato e chiedetegli di mescolarlo bene un paio di volte (e per mescolarlo si intende dividere il mazzo in due mazzetti e inserire accuratamente la carte di un mazzetto tra quelle dell'altro). In seguito a ciò le nove carte di picche verranno sparse nel mazzo verso l'alto, ma senza che l'ordine in cui erano disposte venga cambiato. Per ottenere un qualunque numero di sei cifre, voi spiegherete, si scorre il mazzo a carte scoperte e si prendono le prime sei carte di picche il cui valore è espresso da una sola cifra. Le cifre ottenute saranno 1, 4, 2, 8, 5, 7. Mettete poi queste carte in fila sulla tavola. Scegliete poi a caso un numero tra 1 e 6 gettando un dado o, meglio ancora, porgendo a qualcuno un dado immaginario, chiedetegli di gettarlo e di riferirvi la cifra « uscita ». Moltiplicate 142 857 per il numero che egli vi dirà. A questo punto aprite opportunatamente la busta (per sapere dove tagliare moltiplicate per 7 la cifra fornita dal dado, otterrete cosí l'ultimo numero del prodotto) e tirate fuori la striscia per dimostrare che avete indovinato il prodotto.

Molti secoli fa, quando i matematici si resero conto per la prima volta della natura ciclica del numero 142 857, cominciarono a cercare altri numeri, maggiori di questo, che avessero la stessa bizzarra proprietà. che ricerche compiute su questo argomento, sono raccolte nel primo volume di *History of the Theory of Numbers* di Leonard Eugene Dickson; dopo la pubblicazione del libro di Dickson, avvenuta nel 1919, sono state scritte dozzine di lavori su questo argomento. Si giunge alla conclusione che tutti i numeri ciclici sono i periodi dei numeri decimali periodici, ottenuti calcolando il reciproco di certi numeri primi. 1/7, reciproco di 7, genera il decimale periodico 0, 142 857 142 857... Si noti che le cifre componenti il periodo sono sei, esattamente una meno di sette, numero da cui ha origine il periodico. Questa osservazione ci fornisce un metodo per trovare numeri ciclici maggiori. Se $1/p$, dove p è un numero primo, genera un decimale periodico con un periodo di p-1 cifre, questo periodo è un numero ciclico. Il piú piccolo numero primo maggiore di 7 che dà origine a uno di tali numeri è 17. Il suo periodo è il numero ciclico di 16 cifre 0,588 235 117 647 che, moltiplicato per un qualunque valore intero compreso tra 1 e 16, dà un prodotto contenente le medesime 16 cifre disposte nello stesso ordine ciclico. Tutti i numeri ciclici generati da primi maggiori di 7 devono necessariamente iniziare con uno o piú zeri. Se poi si usano per qualche gioco di prestigio o in qualche esibizione di calcolo rapido, gli zeri iniziali si possono anche trascu-

rare purché, naturalmente, ci si ricordi di reinserirli al posto giusto nel prodotto finale.

Ci sono esattamente nove primi minori di 100 che danno luogo a numeri ciclici, e sono 7, 17, 19, 23, 29, 47, 59, 61, 97. Nel diciannovesimo secolo si scoprirono anche altri numeri ciclici piú grandi. William Shanks, il quale è forse piú noto per aver calcolato in modo errato π fino alla settecentosettesima cifra, scoprí il numero ciclico che si ottiene da 1/17 389, e ne calcolò anche tutte le 17 388 cifre (questa volta correttamente). Fino a oggi si sono identificati i primi che generano numeri ciclici calcolando $1/p$ e contando le cifre per vedere se sono p-1. Il metodo è piuttosto noioso (anche se oggi i calcolatori elettronici eseguono questo calcolo molto rapidamente), ma nessuno ancora ne ha trovato uno piú semplice. Ci sono molti altri modi per ottenere numeri ciclici, ma sfortunatamente sono tutti altrettanto macchinosi. C. Stanley, in *Tomorrow's Math*, fa notare che ancora non sappiamo se prendendo in considerazione via via tutti i primi, la frequenza dei numeri ciclici tenderà ad aumentare, a diminuire, o a rimanere la stessa. Per i primi 1000, riferisce Ogilvy, la proporzione tra tutti i numeri primi e quelli che originano numeri ciclici è circa 1 a 3.

Nessuna frazione con denominatore d può generare un periodo con un numero di cifre maggiore di d-1. Poiché il periodo raggiunge questa lunghezza massima solo se d è primo, si può dire che un numero ciclico è in pratica equivalente al periodo di massima lunghezza che si ottiene calcolando i reciproci degli interi. È facile far vedere perché il periodo può contenere al massimo d-1 cifre. Quando si divide 1000 per d, mano a mano che si procede nell'operazione di divisione, si possono ottenere al massimo d-1 resti diversi. Non appena si trova un resto uguale a uno di quelli ottenuti precedentemente, ha inizio il periodo del numero decimale; per questo non esiste una frazione con denominatore d che abbia un periodo con piú di d-1 cifre. È anche facile vedere perché quando il periodo raggiunge questa lunghezza massima il numero è ciclico. Si consideri 8/17. Poiché dividendo 1 per 17 si ottengono tutti i resti possibili, dividendo 8 per 17 non si fa altro che far scattare il processo ciclico da un punto diverso ma si è certi di ottenere lo stesso ordine. Moltiplicando il numero ciclico generato da 1/17 per 8 si ottiene lo stesso risultato che si ottiene calcolando il periodo di 8/17; di conseguenza il prodotto deve essere una permutazione ciclica delle stesse 16 cifre che compongono il periodo di 1/17.

Quando un numero ciclico viene moltiplicato per il numero primo da cui ha origine, il prodotto è formato sempre da una serie di 9. Per esempio 142 857 × 7 = 999 999. Basandosi su questa proprietà si possono cercare i numeri ciclici anche in un altro modo: si divide un primo p per una serie di 9 fino a che non vi sia resto. Se il quoziente ha p-1 cifre, è un numero ciclico. Ancor piú inaspettato è il fatto che separando in due parti un qualunque numero ciclico o una qualunque delle sue permutazioni si ottengono due numeri che, sommati danno una serie di 9. Per esempio, 142 + + 857 = 999. Un altro esempio si ha dividendo in due il numero ciclico generato da 1/17 e sommando le parti cosí ottenute:

```
 05 882 352
 94 117 647
-----------
 99 999 999
```

Questa strana proprietà non è che un caso speciale del «Teorema di Midy» attribuito da Dickson a E. Midy, che lo pubblicò in Francia nel 1836. Questo teorema afferma che se il periodo di un decimale periodico a/p (con p primo e a/p ridotto ai minimi termini) ha un numero pari di cifre, separandolo in due parti uguali e sommando le parti tra di loro, si ottiene una serie di 9. Ci sono dei numeri primi, come 11, che hanno periodi con un numero dispari di cifre. Tutti i numeri ciclici sono però costituiti da un numero pari di cifre, e pertanto a essi si può applicare il teorema di Midy. È utile non dimenticare questa proprietà: infatti nel caso si debba eseguire la divisione per ottenere un numero ciclico, ci si può fermare a metà. Si possono ottenere direttamente le altre cifre guardando quelle già ottenute e scrivendo una di seguito all'altra le loro differenze da nove. Naturalmente dal teorema di Midy segue anche che tutti i numeri ciclici sono multipli di nove, in quanto ogni numero, le cui cifre sommate tra loro danno un multiplo di nove, è a sua volta un multiplo di nove. Il lettore a cui interessi una dimostrazione anche elementare del teorema di Midy può trovarla in *The Enjoyment of Mathematics* di Hans Rademacher e Otto Toeplitz. Un'altra dimostrazione la fornisce W. G. Leavitt in *A Theorem on Repeating Decimals* che si trova in «The American Mathematical Monthly», giugno-luglio 1967, pagine 669-673.

La striscia continua (in alto) posta nella busta (in basso) per il trucco di previsione.

I numeri ciclici godono di molte altre proprietà abbastanza curiose, e il lettore potrà cercare di scoprirne qualcuna da solo. Ne esporrò ancora una soltanto. Ogni numero ciclico si può generare in vari modi come somma di una progressione aritmetica scritta lungo una diagonale. Per esempio si può partire da 14 e, raddoppiando ogni volta il numero ottenuto, si incolonnano le cifre in modo che ognuna sia sfasata di due posti verso destra rispetto a quella superiore:

```
14
  28
    56
     112
       224
         448
           896
--------------
142857142857...
```

La somma riproduce il piú piccolo numero ciclico. Un altro metodo è quello di partire da 7 e di scendere in diagonale verso sinistra moltiplicando ogni volta per 5 il numero precedentemente ottenuto:

```
          7
        35
      175
    875
  4375
  .
 .
----------
.....142857
```

Lo stesso procedimento applicato alla serie geometrica di ragione 2 e primo termine 1 (1, 2, 4, 8, 16, 32,...) fa ottenere il periodo di 1/19 che è il terzo numero ciclico: 052 631 578 947 368 421. Scrivendo la serie geometrica di ragione 3 (01, 03, 09, 27, 81,...) in diagonale verso il basso a destra e spostandosi a ogni addendo di due posti a destra, si ottiene il periodo di 1/97, il piú grande numero ciclico generato da un primo minore di 100.

Concluderò questa breve discussione, in cui ho toccato solo alcune delle affascinanti proprietà dei periodici ciclici, chiedendo ai lettori di scoprire le proprietà cicliche in 076 923, che è il periodo di 1/13. Questo numero non è un vero ciclico, si potrebbe infatti definire un ciclico di secondo ordine. La risposta che uscirà il prossimo mese consentirà di aprire una nuova serie di ricerche strettamente legate al gruppo piú noto dei ciclici del primo ordine, cioè di quei numeri ciclici che abbiamo appena considerato.